Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Strukturmechanik
Professur Baumechanik

Diplomarbeit

Erstellung eines modularen Systems zur dynamischen Messwerterfassung mit Hilfe der grafischen Programmierumgebung LabVIEW

cand.-Ing. Johannes Gramse
geb. am 6. August 1978 in Erfurt
Matrikelnummer 990775

Erstprüfer: Prof. Dr. Christian Bucher
Zweitprüfer: Dr.-Ing. Volkmar Zabel

Reg.-Nr.: B / 2006 / 35
Ausgabedatum: 28. Juni 2006
Abgabedatum: 29. September 2006

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Weimar, 29. September 2006 _____

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung **3**

1 Einleitung **9**
1.1 Motivation . . . 9
1.2 Probleme der Vorgängersoftware . . . 9
1.3 Zusätzliche Erweiterungen . . . 9
1.4 Eine Übersicht . . . 10

2 Messtechnik und Sensoren **11**
2.1 Allgemeines zur Messtechnik . . . 11
2.2 Sensoren . . . 12
2.2.1 Geschwindigkeitssensoren . . . 13
2.2.2 Beschleunigungssensoren . . . 16
2.3 Normen . . . 17
2.3.1 DIN 1319 - Grundlagen der Messtechnik . . . 17
2.3.2 DIN 4150 - Erschütterungen im Bauwesen . . . 18
2.3.3 DIN 45669 - Messung von Schwingungsimmisionen . . . 20
2.3.4 VDI 2057 - Einwirkung mechanischer Schwingungen auf Menschen . . . 21

3 Werteerfassung und Ausgabe **23**
3.1 Signale und Umwandlung . . . 23
3.2 Datenerfassung Analog-Digital . . . 24
3.2.1 Analog-Digital Wandler . . . 24
3.2.2 Begriffe . . . 26
3.3 Datenausgabe Digital-Analog . . . 30
3.3.1 Digital-Analog Wandler . . . 30
3.4 Digitale Ein- und Ausgabe . . . 31

4 Filterungstechnik **33**
4.1 Begriffe . . . 33
4.1.1 Analogfilter . . . 34
4.1.2 Digitalfilter . . . 35
4.2 Filtertypen . . . 35
4.3 Digitale Filterarten . . . 37

4.3.1 FIR-Filter . . . 37
4.3.2 IIR-Filter . . . 38
4.3.3 Übersicht gebräuchlicher Implementierungen . . . 38

5 National Instruments LabVIEW 43
5.1 Entwicklung . . . 43
5.2 LabVIEW Programmierung . . . 46
5.2.1 Virtuelle Instrumente . . . 46
5.2.2 Frontpanel . . . 46
5.2.3 Blockdiagramm . . . 48
5.3 Datenerfassung und Datenanalyse . . . 49
5.3.1 Datenerfassung . . . 49
5.3.2 BUS-Systeme . . . 50
5.3.3 Datenanalyse . . . 51
5.4 Konnektivität . . . 52
5.4.1 DLL und CIN . . . 52
5.4.2 ActiveX . . . 53
5.5 Zusammenfassung . . . 53

6 Softwaresystem 55
6.1 Allgemeines . . . 55
6.1.1 Probleme . . . 55
6.1.2 Lösung . . . 56
6.2 Hauptprogramm . . . 57
6.2.1 Frontpanel . . . 58
6.2.2 Funktionsweise . . . 59
6.3 Unterprogramme . . . 59
6.3.1 Grundeinstellungen . . . 60
6.3.2 Kanalkorrektur . . . 62
6.3.3 Messstatistik . . . 63
6.3.4 HB-Soll-Test . . . 64
6.3.5 Messkettenkalibrierung . . . 65
6.3.6 Messsystemsteuerdatei ändern . . . 67
6.3.7 Aufnehmerkalibrierung . . . 67
6.3.8 Aufnehmersteuerdatei ändern . . . 73
6.4 Hilfefunktion . . . 73

7 Kalibriermessungen 75
7.1 Messsystem . . . 75
7.2 Aufnehmer . . . 76

8 Schlussbetrachtung 81

Literaturverzeichnis **83**

Abbildungsverzeichnis **87**

Tabellenverzeichnis **89**

Index **91**

Anhang **93**

Protokoll der Aufnehmer 2000-2-H 93
Protokoll der Aufnehmer 2003-12 98
Blockdiagramm Kanalkorrektur 103
Blockdiagramm Hauptprogramm 105

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Bei der Anfertigung einer Studienarbeit mit dem Titel *„Erstellung eines Messsystems nach DIN 45669 mit Hilfe der Programmiersprache LabVIEW“* [15] wurde klar, dass dieses Thema einer weiteren Betrachtung bedarf.

In der vorliegenden Diplomarbeit sollen die bei der Erstellung der Studienarbeit gewonnenen Erfahrungen vertieft und aufgetretene Probleme weitgehend gelöst werden.

1.2 Probleme der Vorgängersoftware

In der Vorgängersoftware traten vielfältige Probleme hinsichtlich der Datenanalyse und -speicherung, der Auswertungs- und Reporterstellungsmöglichkeiten, der Automatisierungen im Programmablauf und andere auf. Außerdem waren aufnehmerspezifische Probleme (Kalibrierung, Übertragungsfunktion) und die gleichzeitige Verwendung verschiedener Aufnehmer und unterschiedliche Anzahl von Kanälen in einem Programm ohne manuellen Eingriff in das Blockdiagramm (Integration / Differentiation) ein Schwerpunkt.

1.3 Zusätzliche Erweiterungen

Neben der Lösung vorhandener Probleme steht die Erweiterung des Programmsystems um zusätzliche Funktionen im Mittelpunkt, z.B. Schwingungsmessung an Masten und Türmen, Brücken o.ä. nach den entsprechenden Vorgaben der jeweiligen Normen. Ziel ist eine automatisierte Einbindung der unterschiedlichen Aufnehmer hinsichtlich Übertragungsfaktoren bzw. -funktionen und Aufnehmertypen (Weg/Geschwindigkeit/Beschleunigung). Dies leistet das Kalibriermodul des Programms. Die dabei gewonnenen Werte werden in einer Datei gespeichert, die anderen Anwendungen zur Verfügung steht.

1.4 Eine Übersicht

Die Arbeit gliedert sich in einen Textteil und einen Softwareteil. Die ersten Kapitel des Textteils zeigen den theoretischen Hintergrund der Messtechnik und der verwendeten Programmiersprache LabVIEW. Danach schließt sich eine Erläuterung des in LabVIEW erstellten Programmsystems an. Im siebten Kapitel wird auf die durchgeführten Kalibrierungsmessungen eingegangen. Das achte Kapitel gibt eine kurze Zusammenfassung der gewonnenen Erfahrungen. Im Anhang finden sich zwei Beispielprotokolle der Aufnehmerkalibrierung, erstellt mit dem LabVIEW-Programmsystem sowie das Blockdiagramm des Aufnehmerkorrektur-VIs.

Das eigentliche Softwaresystem steht inklusive aller Hilfsprogramme als LabVIEW-Projekt, ausführbare Exe-Datei und als Setup-Version auf der beilegten CD zur Verfügung. Für die Ausführung wird die LabVIEW-Runtime 8.0.1 benötigt. Der Datenträger enthält außerdem die vorliegende Arbeit im PDF und Latex-Format, Protokolle der Aufnehmerkalibrierungen die Messprogramm-Hilfe und die benötigten Steuerdateien für Aufnehmer und Messprogramm.

Kapitel 2

Messtechnik und Sensoren

Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick zu Prinzipien der Messtechnik und im Speziellen über Methoden der Schwingungsmesstechnik gegeben werden.

2.1 Allgemeines zur Messtechnik

Seit Beginn naturwissenschaftlicher Betrachtungen bedient man sich entsprechender Methoden zur Messung verschiedener physikalischer Größen. Dabei kann die Erfassung von Messwerten einer Messgröße in zwei Arten unterteilt werden - in *direkte* und *indirekte* Messungen.

Direkte Messmethoden bezeichnen die Registrierung eines Messwerts und den darauf folgenden Vergleich mit einem Normal oder einem Maßstab. Nennenswert sind zum Beispiel eine Längenmessung durch einen direkten Vergleich des Wertes mit einem Maßstab oder die Massebestimmung eines Körpers aufgrund einer Referenzmasse (Balkenwaage). Alle anderen Methoden, bei denen nicht über einen direkten Vergleich von gemessenem Wert und Vergleichswert gearbeitet wird, sondern sich eine Berechnung oder Umrechnung des gemessenen Wertes zur Messgröße anschließt, werden als *indirekte* Messung bezeichnet. So arbeitet die klassische Geodäsie mit Winkelmethoden(Triangulation) oder, moderner, mit Laufzeitmessungen von elektromagnetischen Wellen zur Entfernungsmessung. Dabei wird durch einen *indirekten* Vergleich zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts und der dafür benötigten Zeit die dabei zurückgelegte Strecke, die Entfernung, bestimmt. Fast alle modernen Messmethoden beruhen auf dem Prinzip der *indirekten* Messung. *Indirekte* Messtechnik reagiert naturgemäß wesentlich empfindlicher auf Fehler und besitzt auch eine höhere Tendenz zur Fehlerfortpflanzung, da die Messkette, d.h. die verschiedenen Bestandteile eines Messsystems, wesentlich komplexer ist als bei einer *direkten* Methode. Aus diesem Grund werden in der modernen Messtechnik oft umfangreiche Methoden zur Fehlerkorrektur und Redundanz einer Messkette eingesetzt.

Beispielsweise bedient man sich zur Bestimmung der inneren mechanischen Spannungen eines Bauteils einer indirekten Methode - der Dehnungsmessung. Die Messgröße ist dabei

die durch eine Materialdehnung verursachte Widerstandsänderung des Dehn-Mess-Streifens (Abb. 2.1).

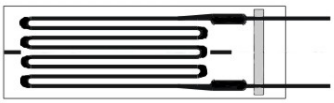


Abbildung 2.1: Dehnmessstreifen

Die Dehnung wird häufig mit einer Anordnung aus vier DMS bestimmt (Beispiel Balken: 2 oberseitige und zwei unterseitige DMS). Dabei erlaubt die spezielle Verschaltung der Sensoren (Wheatstonesche-Brückenschaltung (Abb. 2.2)) eventuelle Störeinflüsse aus Temperaturdifferenzen zu eliminieren.

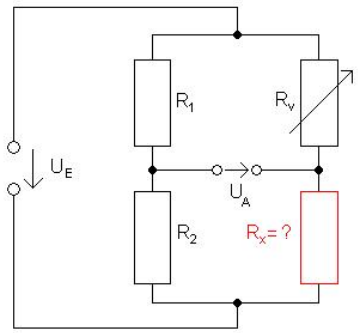


Abbildung 2.2: Wheatstonesche Brückenschaltung

Heutzutage existiert für jeden gewünschten Einsatzzweck eine große Anzahl verschiedener Sensoren und Auswertungssysteme. Die Entwicklung von mechanischen über elektromechanische hin zu elektronischen Messsystemen ist fast abgeschlossen. Somit vereinfacht sich die Auswertung und Analyse sowie Speicherung und Weiterverarbeitung von Messwerten. Mit der rasanten Entwicklung der Digitaltechnik ab Anfang der 1970er Jahre und der damit einhergehenden gesteigerten Leistungsfähigkeit von Personal Computern bei gleichzeitig sinkendem Preis treten zunehmend vom Anwender auf Softwarebasis frei konfigurierbare Systeme in den Vordergrund.

2.2 Sensoren

Zur Messung mechanischer Größen wie Kraft (F), Dehnung (ϵ) und Verschiebung (x) sowie Geschwindigkeit ($\dot{x}$) und Beschleunigung ($\ddot{x}$) gibt es verschiedene Kategorien von Mess-

aufnehmern. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die in der dynamischen Messtechnik gebräuchlichen Sensoren. Die Größen Verschiebung ($s = x$), Geschwindigkeit ($v = \dot{x}$) und

Messgröße	Aufnehmertyp	Messart
Kraft	Kraftmessdose	induktiv, piezoresistiv, piezoelektrisch, magnetoelastisch
Dehnung	Dehnmessstreifen	piezoresistiv
Verschiebung (x)	Wegaufnehmer	induktiv, kapazitiv
Geschwindigkeit ($\dot{x}$)	Geschwindigkeitsaufnehmer	piezoelektrisch, induktiv
Beschleunigung ($\ddot{x}$)	Beschleunigungsaufnehmer	kapazitiv, piezoelektrisch

Tabelle 2.1: Aufnehmertypen, (Eigene Darstellung)

Beschleunigung ($a = \ddot{x}$) besitzen für die Schwingungsmesstechnik eine besondere Bedeutung, da sie durch einfache mathematische Operationen direkt ineinander überführbar sind. Somit ist es zur Bestimmung der maximalen Amplituden einer Schwingung fast nebensächlich, welcher Aufnehmertyp zur Messung verwendet wird. Ist die Beschleunigung $\ddot{x}$ mit der Amplitude A und der Frequenz ω folgt:

$$a = \ddot{x} = A \sin \omega t$$

nach Integration ergibt sich die Geschwindigkeit zu:

$$v = \dot{x} = -\frac{A}{\omega} \cos \omega t = \frac{A}{\omega} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

und für die Verschiebung gilt somit:

$$s = x = -\frac{A}{\omega^2} \sin \omega t = \frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t - \pi)$$

Wie aus diesem Beispiel ersichtlich wird, besitzt bei der Differentiation eines Signals die Frequenz ω dieses Signals einen quadratischen Einfluss auf die Amplituden des Weges (Abb. 2.3). Entscheidend an der Messung einer Schwingung ist also nicht unbedingt, welche Größe man tatsächlich aufzeichnet, sondern wie gut sich daraus die abhängigen Größen berechnen lassen. Im Allgemeinen lässt sich eine numerische computergestützte Integration leichter als eine Differentiation durchführen. Dies führt bei Schwingungs- und Erschütterungsmessungen zur vorrangigen Verwendung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsaufnehmern. Im Folgenden sollen diese beiden Sensortypen näher betrachtet werden.

2.2.1 Geschwindigkeitssensoren

Die Ursprünge der Schwingungs- und Erschütterungsmessung liegen im Bereich der Geophysik. Die Erforschung der Plattentektonik und die damit zusammenhängenden Erscheinungen

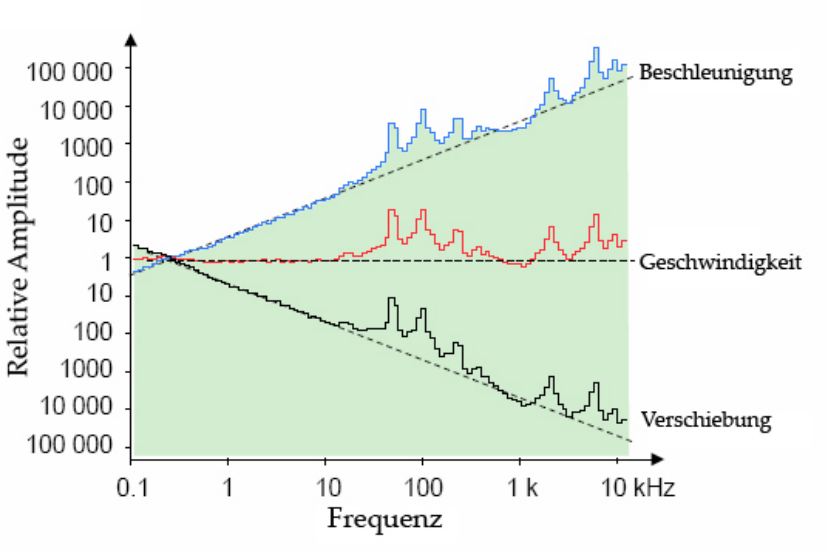


Abbildung 2.3: Frequenzabhängigkeit der Amplituden von x, $\dot{x}$ und $\ddot{x}$, (aus [2])

wie Vulkanismus und Erd- und Seebeben machten die genaue Bestimmung von Daten dieser Prozesse nötig und förderten die Entwicklung verschiedener Theorien. So zum Beispiel die Theorie der Wellenausbreitung in festen Medien. Um diese Daten messen zu können, bediente man sich einfacher schwingender Massen, deren Trägheit eine relative Gegenbewegung der *seismischen* Masse gegenüber der sich bewegenden Erdoberfläche bewirkt. So entstanden die ersten Seismometer (Abb.: 2.4).

Abbildung 2.4: Vertikalseismograph von Cancani im Vesuvobservatorium, 1902, (aus [25])

In Kombination mit einer Aufzeichnungseinheit wird dieser „Ein-Massen-Schwinger“ auch als *Seismograph* bezeichnet. Durch verschiedene Probleme dieser Technik war die Genauigkeit

der Messungen nicht sehr groß. Ursächlich hierfür waren vor allem die Temperaturabhängigkeit und Reibung der Mechanik.

Abbildung 2.5: Das Zürcher Blattfederseismometer, (aus [25])

Ein weiteres Problem war die genaue Aufzeichnung der Daten auf Papierrollen und die für globale Messungen (Laufzeit und Entfernung) exakte Messzeit. Mit zunehmender Entwicklung der Elektrotechnik Anfang des 20. Jahrhunderts wurde durch den Einsatz von elektromechanischen Elementen (Tauchspulen; Wirkung durch elektrische Induktion) die Auswertemöglichkeiten des Systems verbessert, da sich dadurch erstmals Messwerte elektrisch aufzeichnen ließen (Abb. 2.5).

Abbildung 2.6: Modernes Geophon, (aus [25])

Mittlerweile sind diese Sensoren (Masse, Feder, Spule, Gehäuse) wesentlich handlicher und genauer als ihre Vorgänger. Die einfachsten dieser Aufnehmer, die Geophone (Abb. 2.6), besitzen je nach Messbereich Abmessungen von Faustgröße bis zur Größe einer Waschmaschine. Durch die spezielle Konstruktion der Aufhängung der schwingenden Masse lassen sie sich nur in jeweils einer Messrichtung verwenden, d.h. entweder horizontal oder vertikal. Geophone als Teil eines Messsystems auf Computerbasis lassen eine digitale Speicherung der gemessenen Daten sowie die weltweite Verfügbarkeit dieser Werte zu. Dies ist ein wichtiger Aspekt in der Entwicklung von Erd- und Seebebenfrühwarnsystemen. Der Messbereich dieser Technik ist von den Abmessungen des Sensors, seiner seismischen Masse, der Dämpfung sowie der Empfindlichkeit seiner elektromechanischen Teile abhängig.

2.2.2 Beschleunigungssensoren

Beschleunigungssensoren beruhen auf denselben Prinzipien der Massenträgheit wie Seismometer. Frühe Instrumente dieser Art besaßen ähnliche Masse-Spule-Systeme. Diese wurden wegen ihrer Ungenauigkeit durch Systeme mit biegsamen Quarz-Stäben (Q-Flex) oder magnetisch stabilisierten Massen ersetzt. Die heutzutage üblichen Beschleunigungsaufnehmer beruhen meist auf piezoelektrischer Systemen (Abb. 2.7) oder sind als MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) aufgebaut.

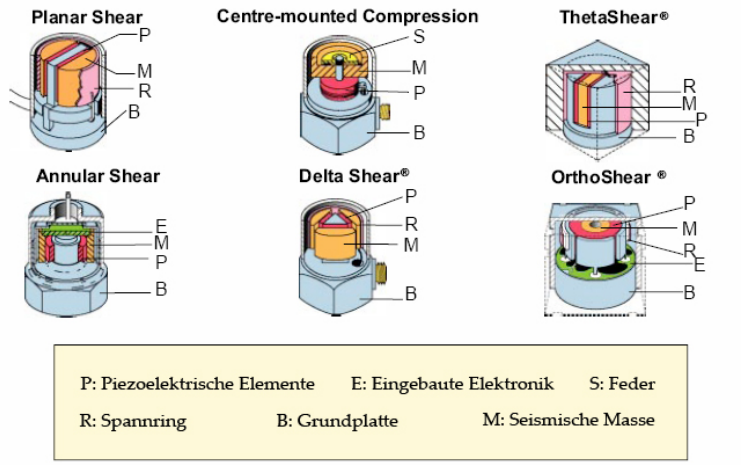


Abbildung 2.7: Verschiedene Typen von Beschleunigungsaufnehmern, (aus [2])

Sensoren mit piezoelektrischer Funktionsweise zeichnen sich durch ein gutes dynamisches Verhalten aus. In diesem Material werden durch Aufbringen einer mechanischen Spannung elektrische Ladungen getrennt. Diese Ladungen können an der Oberfläche abgeführt und zur Messung genutzt werden. Technische Anwendung haben nur der longitudinale Piezoeffekt und der Schubeffekt. Da die verwendeten dielektrischen Quarzkristalle sehr steif sind,

haben sie in der Regel einen Messweg von wenigen μm. Die Eigenverformungen können hier meist vernachlässigt werden. Es lassen sich Vorgänge unter einer μs messen. Die Anforderungen an das Isolationsmaterial des Aufnehmers sind relativ hoch, da geringe Fehler große Messabweichungen zur Folge haben können.

Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme oder Mikroaufnehmer werden aus Silizium hergestellt. Dabei handelt es sich um Feder-Masse-Systeme, bei denen die "Federn"nur wenige μm breite Silizium-Stege sind und auch die Masse aus Silizium hergestellt ist. Durch die Auslenkung bei Beschleunigung kann zwischen dem gefedert aufgehängten Teil und einer festen Bezugselektrode eine Änderung der elektrischen Kapazität gemessen werden. Der gesamte Messbereich entspricht einer Kapazitätsänderung von nur ca. 1 pF. Durch ihre geringe Größe besitzen sie eine hohe Messgeschwindigkeit. Deshalb werden sie beispielsweise auch im Kraftfahrzeugbau zur Airbag-Auslösung verwendet.

Beschleunigungsaufnehmer besitzen wie alle messtechnischen Systeme einen bestimmten Messbereich und spezielle Anforderungen an ihre Befestigung während einer Messung. Durch ihre hohe Sensivität von wenigen μg, ihren großen Dynamikumfang, die große Frequenzbreite sowie ihre Richtungsunabhängigkeit werden sie bevorzugt bei Erschütterungsmessungen eingesetzt.

(Siehe: [3, 2, 24, 23, 19, 25, 29, 38, 25])

2.3 Normen

2.3.1 DIN 1319 - Grundlagen der Messtechnik

In DIN 1319 werden die grundlegenden messtechnischen Begriffe und Zusammenhänge wie Messwert, Messgröße, Fehler, Abweichung, Toleranz etc. erläutert. Sie gliedert sich in vier Teile:

- Teil 1: Grundbegriffe [7]
- Teil 2: Begriffe für die Anwendung von Messgeräten [6]
- Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße [4]
- Teil 4: Auswertung von Messungen mehrerer Messgrößen [5]

2.3.2 DIN 4150 - Erschütterungen im Bauwesen

Ein wichtiger Aspekt der Bewertung von Gebäuden stellt das Maß an eingetragenen Erschütterungen dar. Die für Schwingungen im Bauwesen grundlegende Norm ist die DIN 4150. In dieser Norm werden Beurteilungsverfahren zur Bestimmung der Größe der Beeinträchtigungen für Mensch und Gebäude erläutert. Sie untergliedert sich in drei Teile:

- In Teil 1 [12] werden Anhaltspunkte zur Vorermittlung von Schwingungsgrößen bei verschiedenen Erschütterungsquellen gegeben.
- In Teil 2 [11] wird die Einwirkung von Schwingungen auf Menschen in Gebäuden behandelt. Es werden Hinweise zur Messung und zur Auswertung gegeben. Anschließend wird ein Verfahren beschrieben, das die Beurteilung bezüglich einer Belästigung von Menschen erlaubt. Als weitere Grundlage ist hier die VDI 2057 zu nennen.
- In Teil 3 [10] wird die Einwirkung auf bauliche Anlagen behandelt, wobei frequenzabhängige Grenzwerte für die maximal zulässigen Schwinggeschwindigkeiten am Bauwerk angegeben werden.

Erschütterungen können folgende Auswirkungen haben:

- Direkte Gefährdung von Bauwerken
- Indirekte Gefährdung von Bauwerken
- Belästigung von Menschen in ihrem Wohn- und Arbeitsbereich

Direkte Gefährdung von Bauwerken

Darunter versteht man direkte Schäden an der Bausubstanz durch Überschreiten der zulässigen Spannungen einzelner Bauteile aufgrund dynamischer Beanspruchungen. Durch Schwingungsmessungen kann eine Gefährdung von Bauwerken durch dynamische Belastungen abgeschätzt werden. Dazu werden am Gebäude an verschiedenen Stellen Messpunkte zur Schwingungsmessung angebracht. In der Regel werden triaxiale Messpunkte am Fundament, horizontale Messpunkte in der obersten Deckenebene, sowie vertikale Messpunkte auf den Deckenmitten, installiert, die den Schwingungseintrag in das Gebäude - *die Immission* - und die Schwingungsbelastung aufnehmen.

Als Messgröße werden in der Norm Schwinggeschwindigkeiten bevorzugt, da zwischen Schwinggeschwindigkeiten und typischen Beanspruchungen mindestens näherungsweise ein linearer Zusammenhang besteht. Demzufolge werden vorzugsweise mit Geophonen direkt die Schwinggeschwindigkeiten an den festgelegten Messpunkten gemessen und mit zulässigen, frequenzabhängigen Anhaltswerten der DIN verglichen. Bei Unterschreitung der Anhaltswerte ist eine Verminderung des Gebrauchswertes des Gebäudes nicht zu erwarten. Bei Überschreitung muss der Schwingungseintrag durch Vermeidung von Resonanzen, Änderungen

der Arbeitsfrequenzen, Einsatz anderer Arbeitsgeräte oder -verfahren vermindert werden. Ferner ist auch Ermüdungsversagen zu berücksichtigen. Auf Resonanzen speziell schwach gedämpfter Strukturen ist zu achten, da die Schwingungsgrößen in Resonanznähe besonders groß werden. Resonanzprobleme treten häufig beim An- oder Abschalten harmonisch arbeitender Maschinen auf.

Indirekte Gefährdung von Bauwerken

Darunter werden setzungsbedingte Schäden am Bauwerk verstanden. Zur Vermeidung dieser Gefährdung werden normativ keine Anhaltswerte genannt, da eine allgemeine Charakterisierung des Bodens bezüglich der Setzungsempfindlichkeit bisher nicht angegeben werden kann. Des Weiteren sind die Bodenkennwerte meist nicht bekannt, so dass dieses Problem nur mit Erfahrungswerten beurteilt werden kann.

Belästigung von Menschen

Grundlage für die Beurteilung der Einwirkungen von Schwingungen auf den Menschen ist die DIN 4150 T2, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Mit Hilfe des in dieser Norm beschriebenen Beurteilungsverfahrens können beliebige Schwingungsvorgänge bewertet werden. Die aufgenommenen Schwinggeschwindigkeiten $v(t)$ werden nach DIN 45669 Teil 1 zunächst mit $HB(f)$ frequenzbewertet, um den Einfluss der Frequenz auf die menschliche Empfindlichkeit zu berücksichtigen, ähnlich wie in der Akustik mit der dem Hörempfinden angepassten A-Bewertung.

$$v(t)HB(f) \rightarrow KB(t)$$

Die so erhaltenen bewerteten Schwingstärken $KB(t)$ werden auf den Frequenzbereich von 1 bis $80Hz$ beschränkt. Mit einer Fast-Bewertung (Zeitkonstante = $125ms$) wird für jeden Zeitpunkt der gleitende Effektivwert berechnet und mit $KB_F(t)$ bezeichnet.

$$KB(t) \rightarrow KB_\tau(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_{\xi=0}^{t} e^{\frac{t-\xi}{\tau}} KB^2(\xi)d\xi} \rightarrow \tau = 125ms \rightarrow KB_F(t)$$

Diese Werte werden als Wahrnehmungsstärke oder auch bewertete Schwingstärke KB_F bezeichnet. Im Allgemeinen werden Schwinggeschwindigkeiten ab $0,1$ bis $0,4mm/s$ als spürbar eingestuft. Die Fühlschwelle wurde normativ auf $KB_F = 0,1$ festgesetzt. Dies entspricht einer harmonischen (Sinus-) Erregung von $0,14mm/s$. Im Vergleich dazu liegen die kleinsten zulässigen Anhaltswerte für das Fundament eines Bauwerkes bei $3mm/s$. Eine Belästigung von Menschen kann also bereits stattfinden, wenn eine Gefährdung für das Bauwerk noch ausgeschlossen ist.

Bewertete Schwingstärke KB	Beschreibung der Wahrnehmung
$< 0{,}1$	nicht spürbar
0,1	Fühlschwelle
0,1 - 0,4	gerade spürbar
0,4 - 1,6	gut spürbar
1,6 - 6,3	stark spürbar
$> 6{,}3$	sehr stark spürbar

Tabelle 2.2: Wahrnehmung der bewerteten Schwingstärke KB, (aus [11])

Zur Beurteilung der aufgezeichneten Schwinggeschwindigkeiten wird die Messzeit in einzelne Takte von jeweils 30s Dauer unterteilt. Für jeden Takt wird die maximale bewertete Schwingstärke aus dem Verlauf $KB_{F(t)}$ ermittelt und als Taktmaximalwert KB_{FTi} bezeichnet. Die maximale bewertete Schwingstärke KB_{Fmax} ist der größte Taktmaximalwert, der während der jeweiligen Beurteilungszeit auftritt und der zu untersuchenden Ursache zuzuordnen ist. Mit der Berechnung der gleitenden Effektivwerte und der Informationsbeschränkung auf die Taktmaximalwerte wird gewissermaßen eine dem menschlichen Empfinden angepasste, gut zu beurteilende Informationsbeschränkung durchgeführt.

In DIN 4150, Teil 2 werden für die KB_{Fmax}-Werte obere und untere Anhaltswerte A_o und A_u angegeben.

Für

$$KB_{Fmax} < A_u$$

sind die Anforderungen der Norm eingehalten, für

$$KB_{Fmax} > A_o$$

sind die Anforderungen nicht eingehalten. Liegt der Wert innerhalb der Grenzen

$$A_u < KB_{Fmax} < A_o$$

muss die Beurteilungsschwingstärke KB_{Ftr} über die Beurteilungszeit berechnet werden und kleiner als ein vorgegebener Anhaltswert A_r sein.

2.3.3 DIN 45669 - Messung von Schwingungsimmisionen

Eine weitere wichtige Norm für die Prüfung von Messtechnik und die Durchführung von Schwingungsmessungen ist die DIN 45669. Hier werden unter anderem Anhaltswerte für Amplituden-Frequenzgänge bestimmter Aufnehmer, die Berechnung des KB-Wertes, die Definition bestimmter Genauigkeitsklassen und Probleme bei Filtern näher erläutert. Die Norm untergliedert sich in zwei Teile:

- Teil 1: Prüfung (Kalibrierung und Beurteilung) der Schwingungsmesseinrichtung; Erstprüfung, Nachprüfung, Zwischenprüfung, Prüfung beim Messeinsatz [9]
- Teil 2: Messverfahren [8]

2.3.4 VDI 2057 - Einwirkung mechanischer Schwingungen auf Menschen

Ein neuere Richtlinie zur Beurteilung der Auswirkungen von Schwingungsimmissionen für den Menschen ist die VDI 2057. Dabei werden im Gegensatz zur DIN 4150 keine frequenzbewerteten Geschwindigkeiten, sondern frequenzbewertete Beschleunigungen als Grenzwerte angegeben. Weiterhin findet auch keine quadratische Mittelwertbildung (KB-Wert-Verfahren) statt. Diese Norm besitzt zwei Teile:

- Teil 1: Ganzkörperschwingungen [13]
- Teil 2: Hand-Arm-Schwingungen [14]

Kapitel 3

Werteerfassung und Ausgabe

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten analoger und digitaler Signalerfassung und -verarbeitung geben. Das Erfassen von Messwerten mit Hilfe von Einsteckkarten am Computer soll im Folgenden als Datenerfassung bezeichnet werden. Diese Karten bieten sowohl die Möglichkeit analoge Spannungen zu messen oder auszugeben als auch digitale Signale (Schaltzustände, Bitmuster, Tastraten) aufzunehmen oder zu erzeugen.

3.1 Signale und Umwandlung

Signale werden im wissenschaftlichen Bereich zur Erfassung von Informationen eingesetzt. Im Allgemeinen versteht man unter einem Signal einen Verlauf von Messwerten als Funktion der Zeit oder des Ortes, aber auch ein einzelner Wert kann ein Signal sein. Beispiele solcher Funktionen sind akustische Signale, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen oder Temperaturen.

Wie in Abbildung 3.1 zu erkennen ist, muss jede zu erfassende physikalische Größe zunächst durch einen Messaufnehmer in ein elektrisches Signal umgewandelt werden, entweder in eine Spannung oder in einen Strom. Ist eine Messgröße in ein elektrisches Signal umgewandelt, können die Daten gemessen und interpretiert werden.

Abbildung 3.1: Grundsätzliche Behandlung von Signalen

Normalerweise wird die Information eines Signals mittels eines der folgenden Parameter übermittelt: Zustand, Form, Geschwindigkeit, Frequenzgehalt. Eine erste Klassifizierung erfolgt in Analoge oder Digitale Signale. Ein analoges Signal enthält Informationen in der fortlaufenden Veränderung des Signals in Bezug auf die Zeit und kann jeden beliebigen Wert

zwischen einem Minimum und einem Maximum annehmen. Da man bei analogen Signalen die Zeit in bestimmte Abschnitte einteilen kann, spricht man auch von zeitdiskreten Signalen. Digitale oder binäre Signale hingegen haben nur zwei Zustände: ein hohes (An=1) und ein niedriges (Aus=0) Niveau. Somit läßt sich sowohl der Zeit- als auch der Wertebereich eines solchen Signals in bestimmte Abschnitte teilen. Daher sind digitale Signale zeit- und wertediskret. Es existieren weitere Klassifizierungen von Signalen wie sie in Abb: 3.2 dargestellt sind.

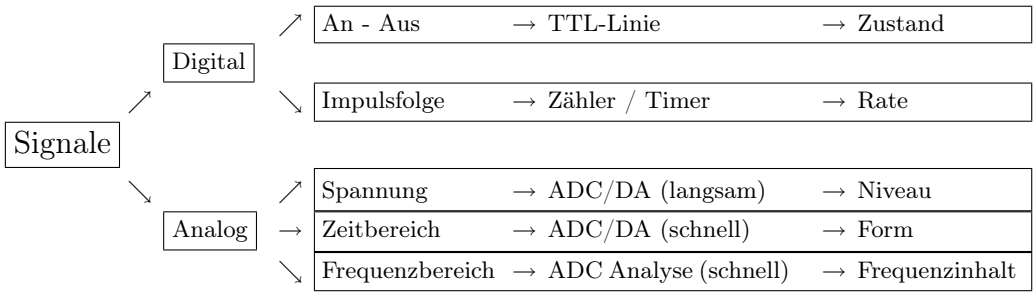

Signale
Digital
Analog
An - Aus → TTL-Linie → Zustand
Impulsfolge → Zähler / Timer → Rate
Spannung → ADC/DA (langsam) → Niveau
Zeitbereich → ADC/DA (schnell) → Form
Frequenzbereich → ADC Analyse (schnell) → Frequenzinhalt

Abbildung 3.2: Signaltypen

3.2 Datenerfassung Analog-Digital

3.2.1 Analog-Digital Wandler

Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) wandeln eine analoge Spannung in ein digitales Signal um. Als Beispiel sei ein DVM (Digital Volt Meter) genannt, welches analoge Spannungen misst und in Dezimalzahlen anzeigt. Der A/D-Wandler ist die zentrale Schnittstelle für alle Mess-, Steuer- und Regelanwendungen in Verbindung mit der Computertechnologie.

Rampenverfahren

Es existiert eine Vielzahl von Methoden ein statisches, d.h. zeitlich unveränderliches, analoges Signal in ein digitales Signal, also eine binäre Zahl zu konvertieren. Jede dieser Methoden hat ihre Vor- und Nachteile und findet, je nach Anforderungen wie Schnelligkeit, Genauigkeit oder Störanfälligkeit, ihren Anwendungszweck. Mögliche Verfahren sind z.B. das Ein-, Zwei- oder Vierrampenverfahren. Als eine Möglichkeit sei hier das Einrampenverfahren näher erläutert.

Ein A/D-Wandler, der nach dem Einrampenverfahren arbeitet, besteht im Wesentlichen aus:

- Rampengenerator

- Fensterkomparator
- Taktgenerator
- Zähler

Der Rampengenerator bildet eine linear ansteigende Spannung U_S von z.B. 0 bis $+10V$. Der Fensterkomparator vergleicht laufend die zu messende Spannung U_E mit der definierten Rampenspannung U_S. Beim Nulldurchgang von U_S startet er einen Zähler, der die Impulse des Taktgenerators zählt. Wird $U_S > U_E$, so wird der Zähler gestoppt. Der Zählerstand stellt dann ein digitales Maß für die Spannung U_E dar.

Vorraussetzung für dieses Verfahren sind eine Rampenspannung konstanter Steigung und eine konstante Frequenz des Taktgenerators. Die Steigung der Rampe und die Frequenz des Taktgenerators sind so aufeinander abgestimmt, dass der Zähler bei maximaler Amplitude der Rampenspannung seinen höchsten Wert erreicht.

Der Wandelbereich resultiert aus der Amplitude der Rampenspannung und beträgt typischerweise $0 - 10V$. Die Auflösung des D/A-Wandlers errechnet sich aus dem maximal möglichen Zählerstand, der in der Zeit, in der die Rampenspannung den Wandelbereich durchläuft, erreicht werden kann, d.h. aus der Frequenz des Taktgenerators bezogen auf den Anstieg der Rampe. Hier kommen standardmäßig Zähler mit 8, 12, 16 und 24 Bit zum Einsatz. Damit lässt sich dann bis

- $2^8 = 256$
- $2^{12} = 4096$
- $2^{16} = 65536$
- $2^{24} = 16777216$

zählen. Aus Wandelbereich und Auflösung in „Bit“ lässt sich nach folgender Beziehung die kleinste erkennbare Spannungsänderung berechnen.

$$\Delta U = \frac{Wandelbereich}{2^{Auflösung(Bit)}}$$

Ein Wandelbereich von $0 - 10V$ und eine Auflösung von 16 Bit ergeben somit eine kleinste erkennbare Spannungsänderung von $152,6\mu V$.

Wägeverfahren

Die Erfassung dynamischer Signale bedingt eine Wiederholung dieser Konvertierung in kurzen Zeitabschnitten. Man spricht hierbei von der Abstastrate in Hertz und meint damit die Wiederholung der Abtastung pro Sekunde. Dabei verhält sich die Abtastrate zur Anstiegsgeschwindigkeit der Rampe proportional. Bei einer Abtastrate von $100Hz$ und einer Auflösung von 12 Bit muss die Rampe in wenigstens 0,01 Sekunden durchlaufen sein und die Frequenz des Taktgenerators so hoch gewählt werden, dass innerhalb von 0,01 Sekunden bis 4096 gezählt werden kann. Dies ergibt eine Taktfrequenz von $2^{12} = 409,6kHz$.

Für heute übliche Abtastfrequenzen von mehreren kHz und Auflösungen bis zu 24 Bit kommen aus Geschwindigkeitsgründen keine Umsetzer nach dem Rampenverfahren zum Einsatz. In den bei der computergestützen Messtechnik eingesetzten Multifunktionskarten werden häufig A/D-Wandler nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation (auch Wägeverfahren genannt) genutzt.

Diese Umwandler besitzen die Funktionsgruppen

- Referenzquelle
- Digital/Analog-Umsetzer
- Näherungsregister
- Komperator

Dabei wird im Näherungsregister zunächst das höchste Bit gesetzt. Bei einem 4-Bit-Register entspricht dies der Binärzahl „1 0 0 0“, also der Hälfte der größtmöglichen Zahl „1 1 1 1“. Diese 4-Bit-Zahl wird dann über den D/A-Wandler in eine analoge Spannung konvertiert, welche dann der Hälfte des Wandelbereichs entspricht (Referenzquelle), und dann mit dem Eingangssignal verglichen wird (Komperator). Ist sie größer als das analoge Eingangssignal, bleibt das größte Referenzbit im Register stehen, ist sie kleiner wird es durch 0 ersetzt. Danach wiederholt sich dieser Vorgang mit allen Bits im Näherungsregister bis zum niederwertigsten Bit, dem LSB (least significant bit), welches bei 4 Bit einem 1/16, bei 12 Bit einem 1/4096 usw. des Wandelbereichs entspricht. Am Ende des Vorgangs ergibt sich eine Digitalzahl, welche mit der Genauigkeit des LSB dem analogen Eingangssignal proportional ist. Ein 12-Bit-Wandler, der nach diesem Prinzip arbeitet, erreicht Umsetzzeiten von wenigen μ-Sekunden.

3.2.2 Begriffe

- Multiplexbetrieb - Multifunktionskarten verfügen meist über nur einen A/D-Wandler, können aber bis zu 64 Kanäle messen. Dies geschieht dann im Multiplexbetrieb. Das

heißt, dass die Kanäle nacheinander auf den Wandlereingang geschaltet werden. Daraus ensteht ein geringer zeitlicher Versatz zwischen den Abtastungen der einzelnen Kanäle. Die maximal mögliche Abtastrate pro Kanal ergibt sich aus der Division der maximalen Abtastrate des A/D-Wandlers und der Kanalanzahl.

$$Abtastrate(Kanal) = \frac{Abtastrate(Umsetzer)}{Anzahl(Kanäle)}$$

Man spricht von Summenabtastrate, wenn die maximal mögliche Abtastfrequenz bei der Messung von nur einem Kanal gemeint ist.

- Abtastrate - Die nötige Abtastfrequenz hängt von der *höchsten* zu erfassenden Signalfrequenz ab. Nach dem Theorem von Shannon-Nyquist muss die Abtastfrequenz mindestens das Doppelte der höchsten Zielfrequenz betragen ($f_{abtast} > 2f_{max}$), da ansonsten Pseudofrequenzen im abgetasten Signal auftreten (Aliasing). Bekanntestes Beispiel dafür sind sich rückwärts drehende Räder in Kino- oder Fernsehfilmen, da hier die Bildfrequenz der aufnehmenden Kamera nicht über der zweifachen Drehzahl des Rades liegt. Um qualitative Aussagen im Zeitbereich treffen können, sollten die Abtastraten bei dem 5- bis 10-fachen der größten zu untersuchenden Frequenz liegen. Für eine Frequenzanalyse mittels Fouriertransformation (üblich FFT-Fast Fourier Transformation) benötigt man mindestens die zweifache Zielfrequenz als Abtastfrequenz.

- Abtastdauer - Das zweite Kriterium zur Bestimmung des Frequenzgehaltes ist die Abtastdauer. Für die Festlegung der Abtastdauer ist die *tiefste* zu untersuchende Frequenz maßgeblich. Es gilt hierbei:

$$Abtastdauer(s) = \frac{1}{tiefsteFrequenz(Hz)}$$

  Das heißt, bei einer untersten zu untersuchenden Frequenz von beispielsweise $0,25Hz$ sollte die Abtastdauer mindestens $1/0,25Hz = 4s$ betragen, damit alle Perioden der Frequenz erfasst werden. Besser wäre aber das doppelte oder dreifache der Periodenlänge, damit genügend viele Perioden erfasst werden.

- Auflösung und Verstärkung - Die Auflösung eines Analog/Digital-Wandlers oder ADCs (Analog Digital Converter) wird in Bit angegeben. Gebräuchlich sind 12, 16 und 24 Bit-Auflösungen. Sie gibt Aufschluss über die Genauigkeit mit der ein A/D-Wandler arbeitet. Bei einer Auflösung von 12 Bit und einem Wandelbereich von $10V$ ergibt sich die kleinste erkennbare Spannungsdifferenz zu:

$$\Delta U = \frac{20V}{2^{12}} = 4,88mV$$

  Dieser Wert entspricht dem 20-fachen des LSB bei 12 Bit. Misst man bei einem Wandelbereich von 10 Volt und einer Auflösung von 12 Bit ein Signal mit einer Amplitude

von 12 Bit, so nutzt man die maximale Auflösung von $1LSB = 4,88mV$, und kann somit eine Genauigkeit von

$$\frac{4,88mV}{20V} = 0,025\%$$

erreichen. Würde jedoch die Amplitude des Signals nur $25mV$ betragen, so wäre die Genauigkeit nur noch bei 25%. Das entspräche einem A/D-Wandler von 3-Bit Genauigkeit bei einem Wandelbereich von $10mV$. Da die zu messenden Signale oft nicht zum Wandelbereich passen, müssen sie verstärkt werden beziehungsweise der Wandelbereich angepasst werden. Dies lässt sich, auch pro Kanal, softwaremäßig einstellen und ist meist in Schritten von 1-, 2-, 4-, 8-fach oder 1-, 10-, 100-, 500-fach abgestuft. Damit ist gewährleistet, dass das Signal den gesamten Wandelbereich möglichst voll überstreicht.

- Masse - Spannung ist immer ein Potentialunterschied zweier Körper. Normalerweise wird der Bezug auf $0V$ angenommen der auf das Potential der Erde (Earth Ground) verweist. Viele Steckdosen und angeschlossene Geräte sind „geerdet“, also an Erde „angeschlossen“, daher spricht man auch von Systemerde (System Ground). Dabei steht die Sicherheit im Vordergrund, nicht die Verwendung als Bezugspotential. In der MSR-Technik spricht man dagegen häufig von Bezugserde (Reference Ground). Die gemeinsame Erde kann, muss aber nicht, als Bezugspotential verwendet werden. Viele messtechnische Geräte stellen einen gemeinsamen Bezugs-Masse-Punkt zur Verfügung. Datenerfassungskarten erwarten eine Vorgabe, auf welchen Bezug eine Spannung gemessen werden soll.

  - geerdet
  - ungeerdet/potentialfrei (Floating)

  Ein Spannungssignal, das sich auf die Erde als Bezugspotential bezieht, wird als geerdete Quelle bezeichnet, z.B. Signalgeneratoren oder Stromversorgungen, die über die Steckdose mit der Systemerde verbunden sind.

  Eine Signal, das nicht auf irgendeine gemeinsame Erde bezogen ist, wird als ungeerdete Quelle bezeichnet, z.B. Batterien, Transformatoren oder Trennverstärker.

- Erfassungsarten - Die meisten Datenerfassungskarten bieten zwei Modi zur Datenerfassung. Die in ihnen eingebauten Verstärker und Multiplexer besitzen meist zwei verschiedene Eingangstypen, einen invertierten und einen nicht invertierten. Damit sind zwei Erfassungsarten möglich - „Differential“ (Abb.: 3.3) und „Single Ended“ (Abb.: 3.4 und 3.5). Im Differential-Modus stehen nur halb so viele Eingangskanäle zur Verfügung wie im Single-Ended-Modus, dafür werden durch die Schaltung Störungen, die auf die Messleitungen wirken, eliminiert. Er sollte also besonders bei langen Messleitungen und störträchtigen Umgebungen eingesetzt werden. Außerdem ist zu überlegen, ob massebezogene (grounded) oder massefreie (floating) Signalquellen eingesetzt

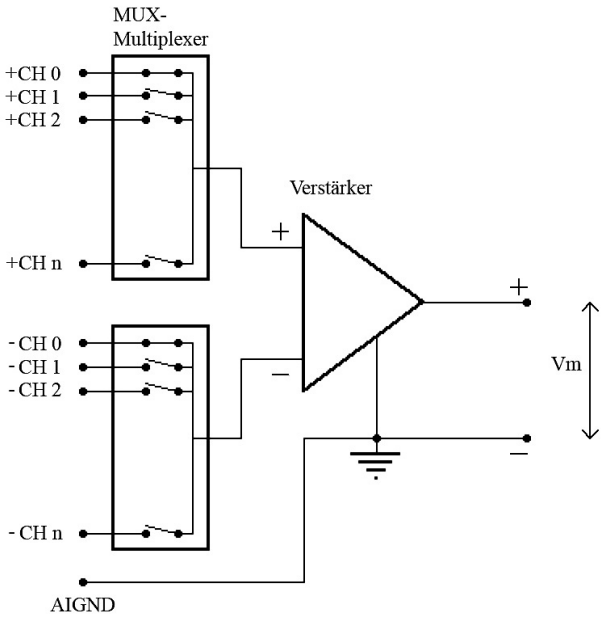


Abbildung 3.3: Differentielle Messung

werden. Diese Einstellungen an der DAQ-Karte können auf Soft- oder Hardwarebasis (Jumper) festgelegt werden.

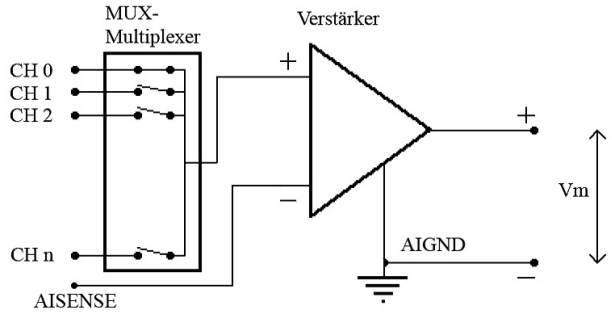


Abbildung 3.4: Referenced Single Ended (RSE)

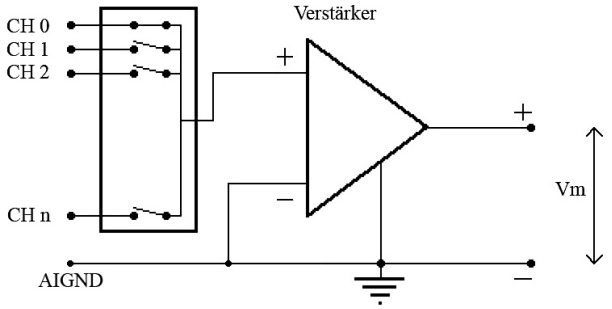


Abbildung 3.5: Non Referenced Single Ended (NRSE)

3.3 Datenausgabe Digital-Analog

3.3.1 Digital-Analog Wandler

D/A-Wandler oder DAC (Digital Analog Converter) setzen eine binäre Zahl in eine proportionale Größe, wie Spannung oder Strom, um. So lassen sich rechnergesteuert beliebige Spannungen zwischen den Grenzen der Referenzspannung erzeugen. Durch die zeitlichen Änderungen der binären Zahl erhält man am Analogausgang des Wandlers eine treppenförmige Spannungskurve (Abb.: 3.6), ein wertdiskretes, zeitkontinuierliches Ausgangssignal. Bei einer

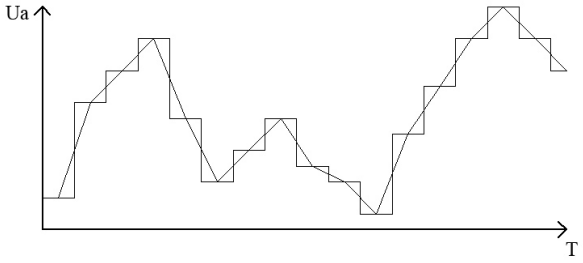


Abbildung 3.6: Geringe Ausgaberate des D/A-Wandlers

hohen Änderungsrate und Auflösung des D/A-Wandlers (Abb.: 3.7) lässt sich jedes beliebige höherfrequente Signal am Ausgang erzeugen. Entscheidend ist, dass der Zeitabschnitt einer konstanten Spannung wesentlich kürzer ist als die Frequenz des zu erzeugenden Signals und das die Spannungssprünge sehr viel kleiner sind als die maximale Signalamplitude. Aufgrund dieser Faktoren werden in der Praxis häufig Tiefpassfilter nachgeschaltet, um ein wertkontinuierliches Signal zu erzeugen.

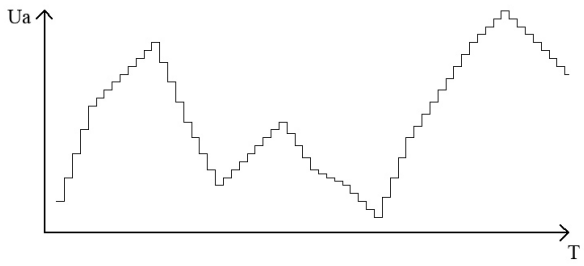


Abbildung 3.7: Hohe Ausgaberate des D/A-Wandlers

Funktionsweise

Ähnlich wie bei A/D-Wandlern gibt es auch bei D/A-Wandlern mehrere Verfahren der Umsetzung. Ein weit verbreitetes ist, wie bei der A/D-Wandlung, das Wägeverfahren. Über ein Widerstandsnetzwerk werden, je nach Wert der binären Zahl im Register, verschiedene Widerstände geschaltet, wobei jedes Bit einen Widerstand schaltet. Bei einem 4-Bit D/A-Wandler entspricht die Zahl „0 0 0 0“ einem Widerstand von nahezu ∞, während die Zahl „1 1 1 1“ einem Widerstand von 0 entspricht. Entsprechend liegt am Analogausgang des Wandlers eine Spannung von $0V$ bis zum Maximum der Referenzspannung an. Diese Spannung ändert sich mit der Zeit und zwar mit der Frequenz der Ausgaberate des Wandlers. Für die Qualität des erzeugten Signals sind die Bit- und Ausgaberate des verwendeten Wandlers, sowie die Größe des sogenannten „Glitch“-Effektes maßgeblich. Als „Glitches“ werden Spannungsspitzen („Spikes“) bezeichnet, die beim Umschalten der Widerstände des DAC auftreten können.

3.4 Digitale Ein- und Ausgabe

Um Schaltzustände zu lesen oder auszugeben, werden digitale Ein- und Ausgänge benutzt. Es wird nicht eindeutig nach Ein- und Ausgabe unterschieden. Die Kanäle können softwaremäßig einzeln oder in Ports zu 4 oder 8 Stück umgeschaltet werden. Verarbeitet werden können in der Regel TTL-Pegel (Transistor Transistor Logic), das heißt, Signale zwischen 0 und 0,8 Volt (Low Signal) als digitaler 0 oder Aus-Zustand, Signale zwischen 2 und 5,25 Volt (High Signal) als 1 oder Ein-Zustand interpretiert werden.

[26, 32, 16]

Kapitel 4

Filterungstechnik

Bei jeder Erfassung von Messwerten kommt es durch verschiedene Effekte zur Veränderung des gemessenen, erfassten Signals, verglichen mit der zu messenden, realen physikalischen Größe. Beispielsweise müssen Signale verstärkt werden oder es können durch nicht genügend abgeschirmte Komponenten, Einstreuungen von nieder- oder hochfrequenten Signalen der Spannungsversorgung der Messtechnik auftreten. Ein weiteres Problem ist die Realisierung einer, beispielsweise normativ bestimmten, Amplituden-Frequenz-Kurve. Um diese Problematiken zu lösen, bedient man sich Filtern, die analoger oder digitaler Art sein können. Filter lassen sich immer auf zwei Arten charakterisieren: durch ihr Verhalten im Frequenzbereich und ihr Verhalten im Zeitbereich. Bei der Betrachtung von analogen Filtern ist der Frequenzbereich entscheidend, bei der digitaler Filter hingegen auch der Zeitbereich.

4.1 Begriffe

Im Folgenden sollen häufig benutzte Begriffe der Filterungstechnik näher erläutert werden.

- *Übertragungsverhalten* - Unabhängig von der Art von Filtern, analog oder digital, aktiv oder passiv, linear oder nicht linear, lässt sich ihre Funktionsweise entweder durch ihre Übertragungsfunktion (Frequenzbereich) oder ihre Impulsreaktionsfunktion (Zeitbereich, inverse Fouriertransformierte der Übertragungsfunktion) beschreiben. Dadurch lässt sich erkennen, wie das Ursprungssignal hinsichtlich Amplitude und Phase, durch Filter oder Messkette, verändert wird (Siehe Abb.: 4.1, 4.2 und 4.3, Übertragungsfunktionen verschiedener Filterarten).

- *Grenzfrequenz* - Als Grenzfrequenz wird diejenige Frequenz bezeichnet, bei der das Ausgangssignal 3 dB unter dem ungedämpften Eingangssignal liegt. Dies entspricht $70,7\%$ oder dem $1/\sqrt{2}$-fachen der Spannung der Ausgangsgröße. Grenzfrequenzen gibt es bei allen Filterarten, sie werden zusätzlich in untere und obere Grenzfrequenz und Mittenfrequenz bei Bandpässen unterschieden.

- *Ordnung* - Die Ordnung eines Filters bestimmt die Steilheit der Übertragungsfunktion beim Übergang vom Durchlassbereich in den Sperrbereich. Die Steilheit steigt mit zunehmender Ordnung um jeweils 6 dB/Oktave, das heißt, ein Filter erster Ordnung weist eine Steilheit von 6 dB/Oktave auf, ein Filter fünfter Ordnung bereits eine Steilheit von 30 dB/Oktave.

- *Dämpfung* - Die Dämpfung bezeichnet die Art des Einschwingverhaltens eines Filters und beeinflusst sein Übertragungsverhalten. Geringe Dämpfungen führen zu einem Überschwingen bei starker Änderung des Eingangssignals. Dämpfungen, die gegen Null gehen, führen zu einem frei schwingenden Oszillator. Beispielweise führt bei einem Filter zweiter Ordnung eine Dämpfung von $\sqrt{2} \approx 1,41$ zu einem optimalen Einschwingverhalten.

- *Kaskadierung* - Zur Realisierung von Filtern höherer Ordnung werden Filter erster und zweiter Ordnung hintereinander geschaltet. Dies erfordert eine gute Entkopplung, damit sich die Filter nicht gegenseitig beeinflussen. Bei der Kaskadierung von Filtern ist darauf zu achten, dass in den meisten Fällen die einzelnen Teilfilter niemals gleich dimensioniert werden dürfen.

- *Linearität* - Man bezeichnet Manipulationen von Signalen, bei denen dem Eingangssignal ein proportionales Ausgangssignal gegenüber steht, als lineares System. Fast alle verwendeten Filter sind lineare Systeme, da sie Amplituden immer proportional zum Eingangssignal verändern. Nichtlineare Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie Signale abhängig vom Signalpegel und ihrem zeitlichen Verlauf verändern. Sie finden eine Anwendung in der Signalverzerrung, so z. B. bei Verzerrern, Begrenzern, Gleichrichtern oder Medianfiltern.

(Siehe: [17, 34, 37, 28, 22, 1])

4.1.1 Analogfilter

Die aus unterschiedlichen Bauteilen zusammengesetzten analogen Filter können als rein elektrische/elektronische oder als elektromechanische Elemente ausgeführt sein. Analoge Filter besitzen einen geringen Preis, eine hoher Geschwindigkeit, unterliegen allerdings Schwankungen der Herstellung und müssen kalibriert werden. Je nach Anforderung steigt die Menge der Bauelemente und die Komplexität der Schaltung. Prinzipiell kommen auch digitale Filter nicht ohne analoge Teile aus, da der Analog-Digital-Wandlung eine analoge Filterung vorausgeht bzw. auch nach einer Digital-Analog-Wandlung durchgeführt wird.

Kommen bei analogen Filtern Bauteile zum Einsatz die sich durch ein frequenzabhängiges Verhalten auszeichnen, wie Widerstände, Quarze, Spulen oder Kondensatoren, spricht man von passiven Filtern. Neben dem Vorteil des einfachen Aufbaus, haben sie allerdings den

Nachteil, dass bei niedrigen Frequenzen meist große Bauteile eingesetzt werden müssen und dass sie schlecht kaskadierbar sind, da sie sich gegenseitig beeinflussen.

Aktive Filter hingegen sind aus Verstärkern und Kondensatoren aufgebaut und benötigen eine Stromversorgung. Durch aktive Filter kann fast jedes Übertragungsverhalten erreicht werden, bei gleichzeitig geringeren Bauteilaufwand als bei passiven Filtern. Den Vorteilen, wie Kaskadierbarkeit und geringer Größe, steht ihre Temperaturabhängigkeit und die Möglichkeit der Übersteuerung gegenüber. Durch die aktiven Elemente werden diese Filter auch zur Signalverstärkung eingesetzt. (Siehe: [17, 34, 27, 1])

4.1.2 Digitalfilter

Mit der Entwicklung der digitalen Technik und entsprechenden Möglichkeiten der Mikrochipindustrie, wie die Herstellung preisgünstiger ADCs und DACs, halten zunehmend digitale Filter in allen Bereich der Signalverarbeitung Einzug. Jede Prozedur die einem Eingangssignal (analog oder digital) durch digitale Bearbeitung ein definiertes Ausgangssignal (analog/digital) zuordnet, kann als digitales Filter verstanden werden. Sie sind das Pendant zu analogen Filtern mit den Vorteilen besserer Reproduzierbarkeit, leichterer Anpassung ohne Hardwareveränderungen und keiner Alterung von Bauteilen. Nachteilig an digitalen Filtern ist ihre hohe Latenzzeit, d.h. ihre Ansprechverzögerung zwischen Signaleingabe und gefilterter Signalausgabe. Es lassen sich digitale Filter sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich realisieren. Sie können soft- oder hardwaremäßig implementiert sein. Das heißt digitale Filter lassen sich mit A/D Wandler, Filter im IC und D/A-Wandler auch als „quasi-analoge“ Bauteile einsetzen. Daneben besteht die Möglichkeit der softwaremäßigen digitalen Filterung, wie beispielsweise in der LabVIEW-Entwicklungsumgebung (Siehe Kapitel 5). Dadurch ist es auch möglich aufwändige Berechnungen nicht in Echtzeit zu erledigen. Beispielsweise lassen sich so alte Schallplatten restaurieren oder durch Analyse von Räumen (Bestimmung der Impulsreaktionsfunktion) und anschließender Faltung mit einem Eingangssignal, lässt sich die Klangcharakteristik dieses Raumes nachbilden. (Siehe: [33, 34, 22, 1])

4.2 Filtertypen

Durch Kombination der zur Verfügung stehenden Filterarten lässt sich beinahe jedes gewünschte Verhalten eines Systems erzeugen. Nachfolgend werden die grundsätzlichen Filtertypen dargestellt. Dabei spielt es keine Rolle, ob sie analog oder digital ausgeführt sind.

- *Tiefpass* - Ein Tiefpass-Filter lässt alle Frequenzen bis zu einer bestimmten Grenzfrequenz f_a passieren, höhere Frequenzen werden gedämpft. Man spricht hierbei von Grenz- oder Eckfrequenz, wenn der Betrag der Amplitude um 0,3 dB abgenommen hat. Tiefpass-Filter finden z.B. eine Anwendung als Rausch oder Anti-Aliasingfilter (Siehe auch Kapitel 3).

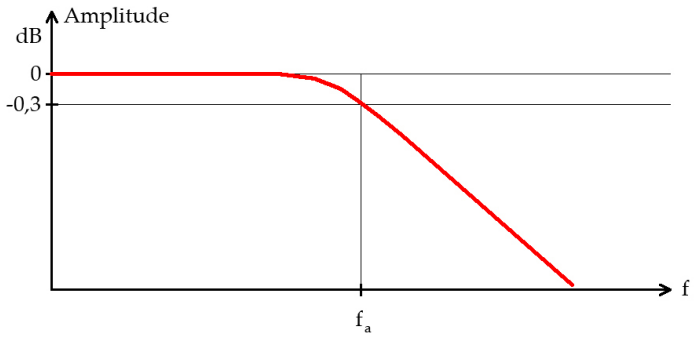


Abbildung 4.1: Tiefpass

- *Hochpass* - Das Hochpass-Filter ist das Gegenteil eines Tiefpasses. Es lässt alle Frequenzen ab der Grenzfrequenz f_a passieren, niedrigere werden gedämpft. Mögliche Anwendungen sind die Reduktion von Gleichspannungsanteilen oder langsamen Driften.

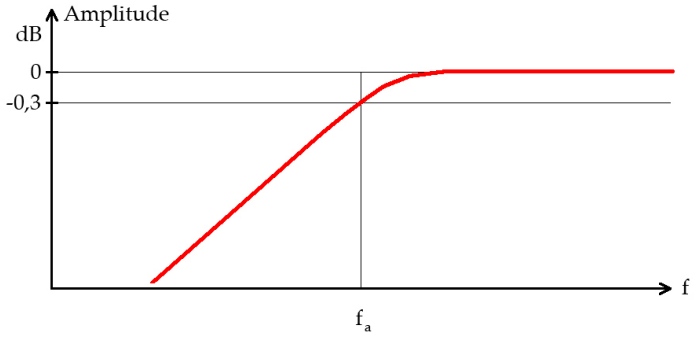


Abbildung 4.2: Hochpass

- *Bandpass* - Kombiniert man Tief- und Hochpass so erhält man einen Bandpass oder einen Bandstop. Bandpässe dämpfen Frequenzen, die außerhalb eines Intervalls zwischen zwei Grenzfrequenzen liegen. Sie kommen häufig zum Einsatz, wenn es darum geht Informationen die als frequenz- oder amplitudenmoduliertes Signal vorliegen, herauszufiltern.

- *Bandstop* - Das Bandstopfilter ist wiederum die Umkehrung des Bandpasses. Es können alle Frequenzen passieren, wenn sie nicht im Intervall zwischen f_u und f_o liegen. Durch diese Filterart lassen sich leicht bekannte, feste Frequenzen, wie Netzfrequenzen gut heraus filtern.

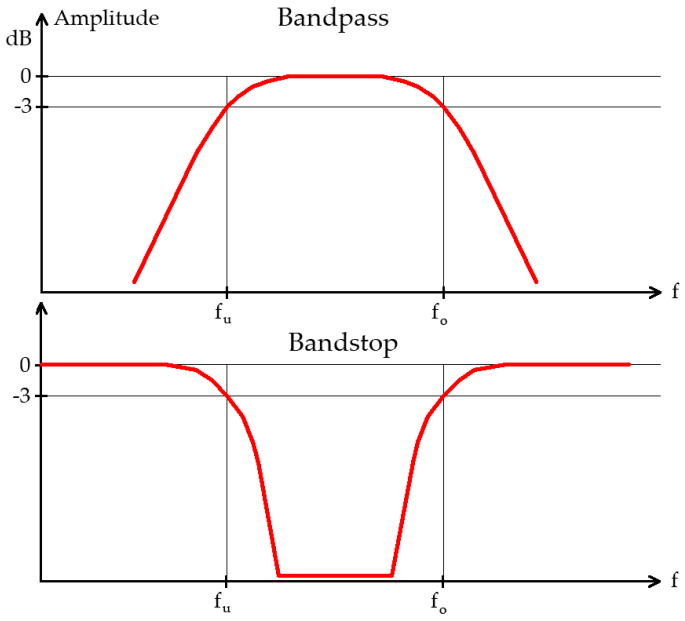


Abbildung 4.3: Bandpass und Bandstop

4.3 Digitale Filterarten

Im Folgenden wird die Betrachtung digitaler Filter im Vordergrund stehen, da sie bei der Realisierung eines computergestützten Messsystems eine maßgebliche Rolle spielen. So werden Eingangssignale generell gefiltert, um Störanteile oder Offset zu eliminieren. Desweiteren ist es möglich durch die Benutzung digitaler Filter, welche auch individuell auf den jeweiligen Aufnehmer abgestimmt sein können, die verwendete Messtechnik zu kalibrieren (Siehe Kapitel 2). Hier sollen kurz die standardmäßigen, auch in LabVIEW (Siehe Kapitel 5) umsetzbaren, digitalen Filter vorgestellt werden.

4.3.1 FIR-Filter

Sind Filter nicht rekursiv, also ohne Schleifen oder Rückkopplungen aufgebaut und besitzen sie eine endliche Impulsreaktionsfunktion, werden sie als FIR-(Finite duration Impulse Response) Filter bezeichnet. Das bedeutet FIR-Filter können, egal wie die Filterparameter gewählt werden, niemals instabil werden oder zu einer selbstständigen Schwingung angeregt werden. FIRs haben keine Entsprechung bei analogen Filtern, können also nicht analog implementiert werden. FIR-Filter weisen folgende weitere Eigenschaften auf:

- FIR-Filter sind immer stabil. Dies folgt aus der Notwendigkeit, dass die einzige n-fache Polstelle der Übertragungsfunktion immer im Ursprung und somit innerhalb des Einheitskreises liegt.

- Die Gleichspannungsverstärkung eines FIR-Filters ist gleich der Summe aller Filterkoeffizienten.
- Die Einheits-Stoßantwort ist die Folge seiner Koeffizienten. Diese Folge ist bei einem FIR-Filter mit Ordnung n immer n+1 Werte lang.
- Die Verstärkung eines FIR-Filters bei der halben Abtastfrequenz ist gleich der im Wechsel mit +1 und -1 gewichteten Koeffizientensumme.
- Durch ihre grundsätzlich garantierte Stabilität werden FIR-Filter bei adaptiven Filtern als Basis für die Filterstruktur eingesetzt.

(Siehe [35, 33, 34, 22])

4.3.2 IIR-Filter

Als IIR-(Infinite duration Impulse Response) Filter bezeichnet man ein zeitdiskretes lineares zeitinvariantes Filter, auch LTI-System (Linear Time Invariant) genannt, mit einem theoretisch unbegrenzten Impulsantwortverhalten. Das heißt, auf einen Impuls folgt nach einer Einschwingphase theoretisch unbegrenztes Nachschwingen. Dieses wird nur durch die filtereigene Dämpfung gemindert. Praktisch realisierbar sind IIR-Filter nur durch Rückkopplungen, also rekursiv.

Gibt es eine Folge $\beta[n] := (\ldots, 0, 1, \beta_1, \ldots, \beta_n, 0, \ldots)$, so dass das Faltungsprodukt $(\beta * S)[n]$ ebenfalls eine endliche Folge $\alpha[n] := (\ldots, 0, \alpha_0, \alpha_1, \ldots, \alpha_n, 0, \ldots)$ ergibt, so spricht man von einem kausalen rekursiven System. Dieses kann durch einen endlichen Algorithmus bzw. eine Signalschaltung realisiert werden, welche Rückkopplungen enthalten, d.h. auf andere, schon berechnete Glieder des Ausgangssignals zurückgreifen. Da es real immer ein erstes Glied gibt, ist in der Praxis eine Einschwingphase zu berücksichtigen.

In praktischen Implementierungen werden IIR-Systeme höherer Ordnung oft durch eine serielle Aneinanderreihung von IIR-Filtern zweiter Ordnung gebildet. (Siehe [36, 33, 34, 22])

4.3.3 Übersicht gebräuchlicher Implementierungen

In Abbildung 4.4 ist der Amplituden-Frequenzgang der im Folgenden genauer vorgestellten digitalen Filtertypen dargestellt. Dabei lassen sich die Unterschiede dieser Filter hinsichtlich Welligkeit, Steilheit im Grenzbereich und Dämpfung im Sperrbereich gut erkennen. Der einzusetzende Filtertyp um ein bestimmtes Systemverhalten zu erreichen, wird sich immer am jeweiligen Einsatzzweck (wellig oder glatt, kleiner oder großer Grenzbereich, Dämpfung und Überschwingen, etc.) und der zur Verfügung stehenden Hard- und Software orientieren.

Eines der meist verwendeten Filter in der digitalen Signalverarbeitung ist das Butterworth-Filter aufgrund seines „glatten“ Frequenzverlaufs.

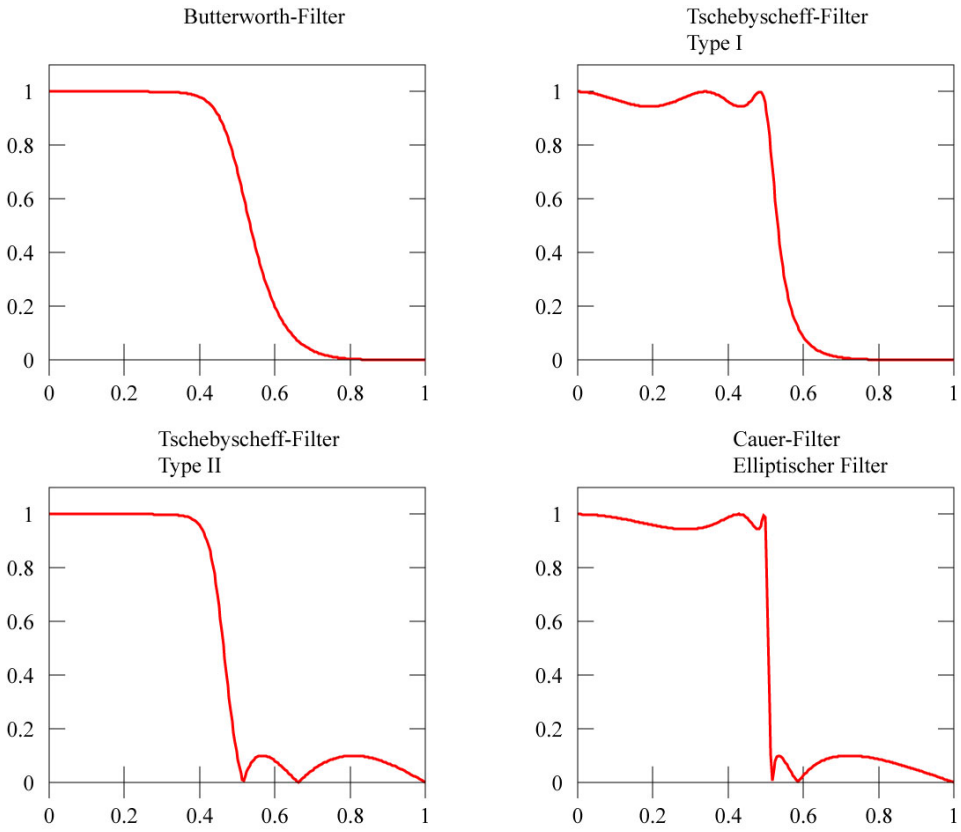


Abbildung 4.4: Amplituden-Frequenzgang verschiedener Filtertypen, $GF = 0,5Hz$, (aus [39])

Butterworth-Filter

Butterworth-Filter sind kontinuierliche Frequenzfilter, die so ausgelegt sind, dass der Frequenzgang unterhalb der Grenzfrequenz ω_g möglichst lange horizontal verläuft. Erst kurz vor dieser Grenzfrequenz soll die Übertragungsfunktion abnehmen und in die Verstärkungsabnahme von $n{\cdot}20dB$ pro Frequenzdekade übergehen. Dabei ist n die Ordnung des Butterworth-Filters. Die Dämpfung bei der Grenzfrequenz beträgt 3dB. Butterworth-Filter haben sowohl im Durchlassbereich als auch im Sperrbereich einen gleichmäßigen, glatten Verlauf der Übertragungsfunktion (Siehe Abb: 4.5). Das Butterworth-Filter besitzt folgende Eigenschaften:

- linearer Frequenzverlauf im Durchlassbereich
- schnelles Abknicken bei der Grenzfrequenz, verbessert sich mit der Ordnung

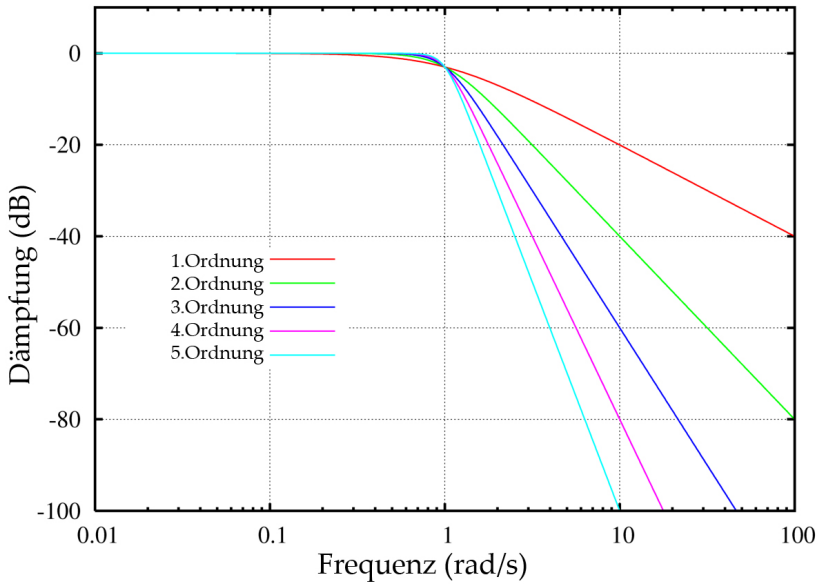


Abbildung 4.5: Amplituden-Frequenzgänge verschiedener Ordnungen eines Butterworth-Filters, (aus [31])

- beträchtliches Überschwingen bei der Sprungantwort, verschlechtert sich mit der Ordnung

(Siehe: [31, 22])

Tschebyscheff-Filter

Tschebyscheff-Filter sind kontinuierliche Frequenzfilter, die auf ein möglichst scharfes Abknicken des Frequenzgangs bei der Grenzfrequenz ausgelegt sind. Dafür verläuft die Verstärkung im Durchlassbereich oder im Sperrbereich nicht monoton, sondern besitzt eine festlegbare Welligkeit. Innerhalb einer Ordnung ist der Abfall umso steiler, je größer die zugelassene Welligkeit ist. Es wird zwischen Tschebyscheff-Filter vom Typ I und vom Typ II unterschieden. Tschebyscheff-Filter vom Typ I besitzen im Durchlassbereich einen oszillierenden Verlauf der Übertragungsfunktion. Tschebyscheff-Filter vom Typ II besitzen die Welligkeit der Übertragungsfunktion im Sperrbereich.

Das Tschebyscheff-Filter besitzt folgende Eigenschaften:

- welliger Frequenzverlauf je nach Typ im Durchlassbereich oder im Sperrbereich
- sehr steiles Abknicken bei der Grenzfrequenz, verbessert sich mit der Ordnung und der Welligkeit

- beträchtliches Überschwingen bei der Sprungantwort, verschlechtert sich mit der Ordnung und Welligkeit

(Siehe: [39, 22])

Bessel-Filter

Ein Bessel-Filter ist ein Frequenzfilter, bei dessen Entwurf folgende Eigenschaften angestrebt wurden:

- optimales „Rechteckübertragungsverhalten“, d. h. eine Wellenform, deren Frequenzanteile innerhalb des Durchlassbereichs des Filters liegen, erscheint (bis auf eine Verzögerung) unverändert am Ausgang
- sämtliche Frequenzanteile des Signals benötigen dieselbe Zeit, um den Filter zu durchqueren
- konstante Gruppenlaufzeit im Durchlassbereich
- linearer Phasengang im Durchlassbereich

Dabei wird in Kauf genommen, dass der Amplitudenverlauf nicht so scharf wie beim Butterworth-Filter oder Tschebyscheff-Filter abknickt.

Das Bessel-Filter besitzt folgende Eigenschaften:

- glatter Frequenzverlauf im Durchlassbereich
- geringe Steilheit des Amplitudengangs (geringer noch als beim Butterworth-Filter) im Bereich der Grenzfrequenz
- geringes Überschwingen bei der Sprungantwort, verringert sich mit der Ordnung
- konstante Gruppenlaufzeit im Durchlassbereich

(Siehe: [30, 22])

Kapitel 5

National Instruments LabVIEW

Betrachtet man die Technologien um die Mess- und Automatisierungstechnik, so ist eine Weiterentwicklung zu sehen die maßgeblich von der Computertechnik verursacht wird. Wurden früher Messgeräte oft für einen bestimmten Einsatzzweck konstruiert, ergaben sich daraus bestimmte Geräteklassen und Anwendungskategorien. Durch die PC-orientierte Messtechnik erschließen sich völlig neue Anwendungsgebiete hinsichtlich der Softwarearchitektur, der Datendurchgängigkeit und -verfügbarkeit.

Durch den verstärkten Einsatz des PC nicht nur im Expertenbereich ergeben sich auch Änderungen bei den Betriebssystemen und Programmiersprachen. So ist ein eindeutiger Trend zur grafischen Benutzeroberfläche vorhanden. Dadurch lassen sich auch komplexe technische Sachverhalte, die vorher hauptsächlich von Experten mit fundiertem Wissen in textbasierter Softwareentwicklung programmiert wurden, auch von Anwendern mit geringer Erfahrung in diesem Bereich umsetzen und lösen.

Während in vielen Bereichen die Behandlung großer Zahlenmengen mit dem PC bereits seit den Anfängen der Computertechnologie zur Standardanwendung gehörte, war es im Bereich der Messtechnik lange Zeit nicht möglich ohne großen Aufwand eine kleine Anzahl von Messwerten mit einem Rechner zu erfassen oder auszuwerten. 1983 begann Jeff Kodosky, Mitbegründer von *National Instruments* mit einer kleinen Gruppe von Studenten nach einer Methode zu suchen, mit der der Zeitaufwand zur Erstellung von Messsystemen reduziert werden könnte. So entstand LabVIEW, eine intuitive, verständliche Benutzeroberfläche kombiniert mit einer innovativen Programmiermethodik, basierend auf dem Datenflussmodell.

5.1 Entwicklung

- 1986 wurde nach drei Jahren Entwicklungsarbeit die Pionierversion der heutigen Software auf einem Macintosh-Computer der Firma Apple vorgestellt. Die grafischen Möglichkeiten des Computersystems schienen für die Realisierung von LabVIEW am besten geeignet.

- 1990 erschien die zweite Version von LabVIEW. Sie beinhaltete auch einen grafischen Compiler, der die Umsetzung des Blockdiagramms in optimierten Maschinencode realisierte.
- 1992 erschien LabVIEW für Windows und für Sun.
- 1993 erschien LabVIEW 3 für Windows, Sun und Macintosh. Durch die Plattformunabhängigkeit von LabVIEW ließen sich Programme, die auf einer bestimmten Plattform geschrieben waren, auch auf andere übertragen.
- 1994 wurde der Umfang der Computersysteme auf Windows NT, Power Macintosh und HP-Workstations ausgedehnt.
- 1995 erschien die für Windows 95 geschriebene Variante von LabVIEW.
- 1996 erschien LabVIEW Version 4. Sie wurde 1997 um die Möglichkeiten der LabVIEW-Assistenten ergänzt (4.1). Auf Vorgabe des Anwenders erstellen die Wizzard-Hilfsprogramme sofort lauffähige LabVIEW-Programme.
- 1998 erschien die Version 5 der LabVIEW-Entwicklungs-Umgebung. Sie enthielt bereits viele der heutigen, zukunftsweisenden Technologien wie:
  - Multithreading - parallele Abarbeitung verschiedener Prozesse
  - ActiveX - Einbindung, Steuerung und Wiederverwendung von Softwarekomponenten
  - Assistenten zur Gerätesteuerung - automatische Erstellung von Anwendungen zur Gerätesteuerung
  - Werkzeuge zur Dokumentationserstellung - automatische Werkzeuge zum Erstellen von HTML- oder RTF-Dokumentationen
  - Übersetzungswerkzeuge - Generierung mehrsprachiger Programme
  - Konfigurierbare Menüleisten - strukturierte Auswahlmöglichkeiten
  - Undo/Redo Funktionen - Hilfen zur Programmerstellung und Fehlerbehebung
  - Werkzeuge zum grafischen Vergleich - Abstimmen verschiedener Programmversionen mittels grafischem Vergleich der Blockdiagramme
- 2000 erschien Version 6i der LabVIEW-Entwicklungs-Umgebung. Sie wurde konzipiert um in den Bereichen Integration, Information, Intelligenz und Intranet/Internet neue Maßstäbe zu setzen. Die Vorteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:
  - internetoptimiert - leichter Datenaustausch und sofortige Auswertung zwischen vernetzten Rechnern mittels DataSocket, TCP/IP und ActiveX

  - intelligentes Messen - konfigurieren statt programmieren, neuer Datentyp *Waveform* = Signalverlauf enthält alle wichtigen Informationen zur Messung wie Abtastrate und physikalische Einheit, außerdem Einführung des MAX (Measurement and Automation Explorer), welcher die zentrale Schnittstelle für die Konfiguration sämtlicher Messanwendungen ist, weiterhin wurde eine Reihe neuer vorkonfigurierter VIs für Mess- und Analyseanwendungen zur Verfügung gestellt
  - intuitive neue Benutzeroberfläche - ansprechendes benutzerfreundliches Design wie 2D- und 3D-Look, Tipp-Strips und Registerkarten, sowie systemeigene Gestaltungselemente wie Dialogboxen u.ä.
  - Integration - Einbindung externen Programmcodes in Form von DLLs oder Shared Libraries möglich, ab sofort auch umgekehrter Weg möglich, LabVIEW-VIs können in DLLs oder EXE-Dateien kompiliert werden und stehen externen Anwendungen zur Verfügung

- 2003 erschien LabVIEW 7.0 Express. Es wurde klar, das die Ansätze einer grafischen Programmiersprache auch Unterschiede in den Anwendern berücksichtigen müssen. So sind die meisten Problemstellungen in der MSR bereits durch sogenannte Express-VIs abgedeckt, andererseits können aber auch die vielen enthaltenen Sub-Level-VIs zur Lösung heran gezogen werden.
  - erstmals Unterschied zwischen LabVIEW Base-, Full- und Professional-Development-Systems
  - über 400 neue vorkonfigurierte VIs zur Erstellung eines Programms
  - Interaktive Instrumenten-I/O - neue Werkzeuge, die die Datenerfassung und Gerätesteuerung weiter vereinfachen, neuartige Architektur des NI-DAQ-Treibers (NI-DAQmx ab LabVIEW 7.1) sowie neue interaktive Assistenten, die den Anwender schrittweise durch Konfiguration, Prüfung und Programmierung von Messaufgaben führen
  - LabVIEW Real-Time - erstellen einer Anwendung auf einem Hostrechner und portieren auf ein Zielgerät mit Echtzeitbetriebssystem
  - LabVIEW DSC - Datalogging and Supervisory Control, unkomplizierte Entwicklung und Nutzung verteilter Regel-, Steuer- und Überwachungssysteme von National Instruments, optimierter Viewer für historische Daten, ODBC und Datenbanknutzung,
  - LabVIEW PDA - Entwicklung mobiler Mess- Steuer- und Regelanwendungen am Hostrechner und Download auf PDA oder Palm, unterstützte Systeme: Pocket PC von Microsoft und Palm OS, prädestiniert für mobile Prüf- und Datenerfassungslösungen, sowie Fernsteuerungs- und -überwachungssysteme

– LabVIEW FPGA - (Field Programmable Gate Array); frei programmierbarer Logikschaltkreis, Programmierung über LabVIEW, Entwicklung einer Anwendung auf Host-Rechner und „Brennen“ auf Hardware, kostensparende Entwicklung von „In-Box-MSR-Systemen“

5.2 LabVIEW Programmierung

Eine LabVIEW Programmierung erfolgt in der grafischen Programmiersprache G. Die einzelnen Programmteile werden durch zusammenfügen von grafischem Code auf dem Blockdiagramm erstellt. Dabei lassen sich nicht nur kleine im Laboralltag übliche Mess- und Auswerteprogramme erstellen, sondern durch einfügen von Unterprogrammen, den SubVIs auch schnell komplexe, aber überschaubare Lösungen programmieren.

5.2.1 Virtuelle Instrumente

LabVIEW Programme werden im Allgemeinen als Virtuelle Instrumente, VI, bezeichnet da ihr Aussehen und Funktion an reale Instrumente erinnern. Praktisch sind alle LabVIEW Programme durch eine Hierarchie einer unterschiedlich großen Anzahl von VI, in Form einzelner Softwaremodule, „verdrahtet“ und gesteuert durch Flussdiagramme (Blockschaltbildern), gekennzeichnet. Für Anwender werden die folgenden Komponenten eines VI offensichtlich:

- Frontpanel - die interaktive Benutzerschnittstelle
- Blockdiagramm - enthält die Programmierlogik
- Anschlussblock und Symbol - Zum Einsatz von VI in anderen VI müssen ein Symbol und ein Anschlussblock vergeben werden

Virtuelle Instrumente sind hierarchisch und modular aufgebaut und lassen sich als Haupt- oder Unterprogramm verwenden. Dadurch unterstützt LabVIEW das Konzept der modularen Programmierung.

In Tab. 5.1) nachfolgend eine Gegenüberstellung der in LabVIEW und in der herkömmlichen objektorientierten Programmierung gebräuchlichen Begriffe:

5.2.2 Frontpanel

Der Benutzer tritt über das Frontpanel (Abb.: 5.1) in Interaktion mit einem LabVIEW-Programm. In Anlehnung an ein reales Messinstrument dient das Frontpanel zur Eingabe oder Einstellen von Daten sowie zur Anzeige von Werten und sonstiger Statusanzeigen. Es besteht aus den unterschiedlichsten Bedien- und Anzeigeelementen. In Analogie zum

LabVIEW	Herkömmliche objektorientierte Programmierung
VI	(Haupt-)Programm
SubVI	Unterprogramm
Frontpanel	Benutzeroberfläche
Blockdiagramm	Source- oder Quellcode
Funktion	Funktion
Schleifen/Strukturen	Schleifen/Strukturen
Konstanten/Variablen	Konstanten/Variablen

Tabelle 5.1: LabVIEW-Ausdrücke und konventionelle Argumente, (aus[16])

konventionellen Messgerät stellen Bedienelemente typische Eingabeobjekte wie Drehknöpfe, Schalter, und ähnliches dar. Sie dienen der Eingabe und übermitteln Daten an das Blockdiagramm des VI. Anzeigeelemente zeigen vom Programm erzeugte oder gemessene Werte und Daten an.

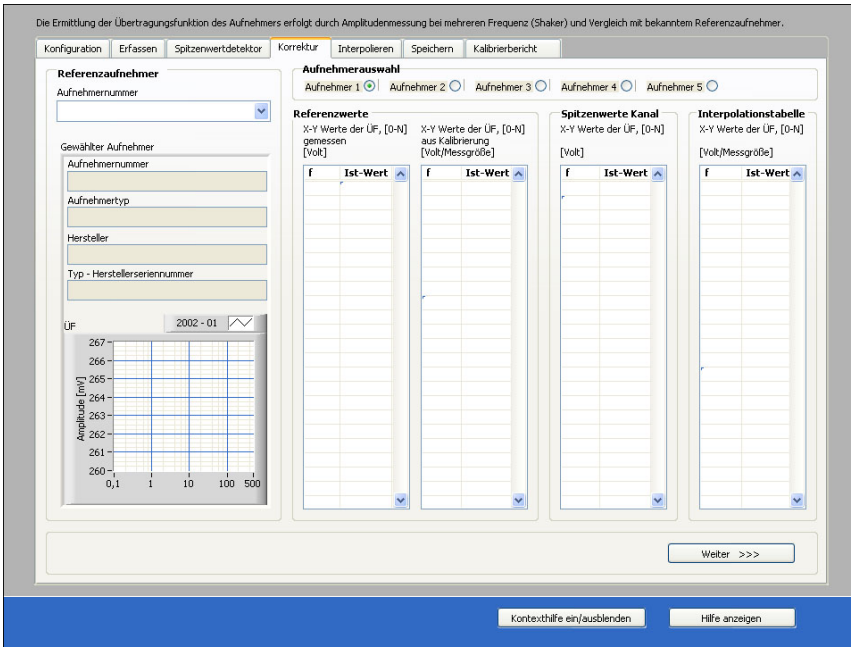


Abbildung 5.1: Frontpanel eines LabVIEW VIs

- Bedienelement = Eingabe des Anwenders = Datenquelle im Blockdiagramm
- Anzeigeelement = Ausgaben an den Anwender = Datensenke im Blockdiagramm

Diese beiden Typen von Frontpanelobjekten sind im Regelfall nicht austauschbar. Man platziert Frontpanelelemente aus den Elementepaletten am gewünschen Platz durch Drag&Drop

(Ziehen und Fallenlassen). Dies wird durch das benutzerdefinierte Ausrichtungsgitter erleichtert. Danach können alle Eigenschaften wie Größe, Form, Farbe und Schriftgröße aber auch Wert/Wertebereich, Aktivstatus, Aktualisierungsgeschwindigkeit und andere Attribute verändert werden. Dabei kann der Programmierer über direkte Methoden (rechter Mausklick -> Kontextmenü) oder über indirekte Methoden (Eigenschaftsknoten im Blockdiagramm) vorgehen. Weiterhin ist es möglich eigene Frontpanelobjekte zu erzeugen, z.B. über ActiveX-Elemente oder anderen externen Code.

5.2.3 Blockdiagramm

Das Blockdiagramm (Abb.: 5.2) stellt das Steuerprogramm eines LabVIEW-VI dar, geschrieben in der grafischen Programmiersprache G. Es ist nicht nur als bloße Illustration eines technischen Sachverhaltes zu sehen, sondern stellt vielmehr das unmittelbar ausführbare Programm dar. Das Blockdiagramm wird erstellt, in dem die Datenquellen und Datensenken einzelner Elemente miteinander „verdrahtet“ also verbunden werden.

Sobald ein Element auf dem Frontpanel platziert wird, werden von LabVIEW automatisch die dazu korrespondierenden Symbole und Anschlüsse im Blockdiagramm erzeugt. Dabei werden Anschlüsse von Bedienelementen dick und die von Anzeigeelementen dünn umrahmt. Diese Anschlüsse werden nur entfernt, wenn das entsprechende Element entfernt wurde. Natürlich gibt es auch Elemente, die keine Entsprechung auf dem Frontpanel besitzen müssen. Dazu gehören z.B mathematische Operatoren, Formelknoten, Datenspeicher- und Lese-VIs, sowie Steuerelemente wie Case-Bedingungen, Schleifen und Strukturen, also alle Elemente, bei denen nicht unbedingt eine Nutzerinteraktion nötig ist. Diese Elemente werden Knoten genannt.

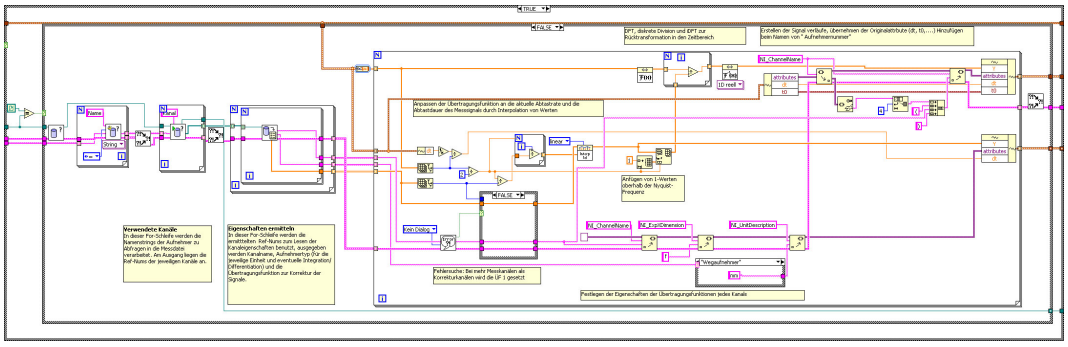


Abbildung 5.2: Blockdiagramm eines LabVIEW VIs

Die Funktionalität von VIs wird durch die Verbindungen zwischen Knoten und Anschlüssen bestimmt. Dabei handelt es sich um Datenpfade zwischen Datenquellen und Datensenken, welche Daten von einer Quelle an eine oder mehrere Senken liefern. Verbindet man mehr als eine Quelle oder schließt keine Quelle an, wird das VI nicht lauffähig sein. Jede Verbindung

besitzt entsprechend ihrem Datentyp eine bestimmte Farbe (Blau, Rosa, Grün, Orange) und einen bestimmten Linientyp (einzeln dünn, einzeln dick, doppelt, gestrichelt).

Die Ausführung des LabVIEW-Blockdiagramms folgt streng dem Datenfluss. Der eingebettete Compiler führt nur dann eine Anweisung aus, wenn alle seine Eingangsparameter vorliegen. Im Gegensatz zu einem C-Compiler, der nur dann eine Anweisung ausführt, wenn die zuvor im Code geschriebene Anweisung ausgeführt wurde. Damit unterscheidet sich die Datenflusstheorie erheblich von der prozeduralen Ausführung. Während herkömmliche Anwendungen befehlsgesteuert ablaufen, erfolgt die Ausführung des LabVIEW-Codes datengesteuert oder datenabhängig.

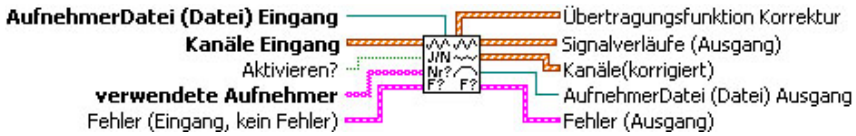


Abbildung 5.3: Anschlussblock eines SubVis

Kommt ein VI als SubVI zum Einsatz, können seine Daten an das aufrufende VI über den Anschlussblock (Abb: 5.3) transferiert werden. Symbolisch wird ein SubVI in einem anderen Blockdiagramm mittels eines Anschlussblocks, der durch sein Symbol charakterisiert ist, dargestellt. Dabei kann das Symbol eine bildliche Darstellung, eine kleine Textbeschreibung des VIs oder eine Kombination aus beiden enthalten. Jeder Anschluss des Anschlussblocks entspricht dabei einer Eingabe oder einer Anzeige auf dem Frontpanel. Während des SubVI-Aufrufs werden die Werte der Eingabeparameteranschlüsse auf die angeschlossenen Eingaben übertragen und das SubVI wird ausgeführt. Nach der Ausführung werden die Ergebnisse über den Anschlussblock an das aufrufende VI zurückgegeben. Das VI-Symbol und der Anschlussblock lassen sich frei konfigurieren, dabei können einem SubVI bis zu 28 Anschlüsse zugewiesen werden.

5.3 Datenerfassung und Datenanalyse

5.3.1 Datenerfassung

Datenerfassungssysteme bestehend aus einem Standard-PC mit eingebauten Datenerfassungs- und Gerätesteuerungskarten sind heute aus der Mess- und Automatisierungstechnik nicht mehr wegzudenken. Seit der Standardisierung universeller Bussysteme zur Kopplung von Messeinrichtungen mit Rechnern beschleunigte sich die Verbreitung PC-gestützter Messtechnik. Beispiele solcher Schnittstellen sind die serielle RS232-Schnittstelle oder der Byte-parallele GPIB. Der letztgenannte Bus, auch als IEC-652-Bus oder IEEE-488-Bus bekannt, erlangte für die Messtechnik eine weitreichende Bedeutung. Unabhängig davon, welche Schnittstelle zum Einsatz kommt, ist das primäre Ziel, Daten rechnergestützt zu erfassen.

5.3.2 BUS-Systeme

GPIB

Der von Hewlett-Packard in den späten 1960er Jahren entwickelte GPIB, General Purpose Interface Bus (Schnittstelle für allgemeine Zwecke), sollte die Kommunikation zwischen Messgeräten und Computer erleichtern. Über ihn werden Daten zwischen Computer und Geräten übertragen. Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) standardisierte den GPIB 1975 zum IEEE-488. GPIB verwendet ein asynchrones Datenübertragungsformat bei dem 8 Bit parallel Byte für Byte übertragen werden, dabei wird die Geschwindigkeit vom langsamsten Teilnehmer bestimmt.

Serielle Schnittstelle

Sie stellt eine weitere Möglichkeit dar, um Daten zwischen verschiedenen Geräten zu transportieren. Standartisiert sind die RS232- und die RS422-Schnittstellen. Serielle Kommunikation verwendet einen Sender der einzelne Bits auf einer Leitung nacheinander (seriell) über eine Leitung an einen Empfänger überträgt. In Zukunft wird auch in der Messtechnik die RS232 weitestgehend von neueren seriellen Schnittstellen wie USB oder FireWire abgelöst werden.

VXI / PXI

Der VXIbus, eine Abkürzung für VMEbus eXtensions for Instrumentation (Erweiterung des VMEbus für die Intrumentierung) und ein Messgerätestandard für „Intrument on a card“-Systeme. Vorgestellt im Jahre 1987 und auf dem VMEbus (IEEE-1014) basierend, ist er eine interessante Plattform für High-End-Anwendungen. VXI besteht aus einem Mainframe-Gehäuse mit Steckplätzen für modulare Messgeräte auf Steckkartenbasis. Da VXI-Systeme eine hoch entwickelte Geräteumgebung mit dem Hintergrund eines modernen Computer kombinieren, haben VXI-Geräte die Fähigkeit mit sehr hohen Geschwindigkeiten zu kommunizieren. Eine weitere Eigenschaft von Geräten, die über den Minimalstandards von VXI liegen, ist VXI-Plug&Play.

USB und FireWire

Der von Intel entwickelte USB (Universal Serial Bus) wurde in erster Linie zur Verbindung mit von Peripheriegeräten mit bis zu 12 Mbit/s entwickelt (USB 1.1). Moderne USB-Produkte übertragen Daten mit bis zu 480 Mbit/s und sind unter USB 2.0 bekannt.

Der sowohl synchron als auch asynchron zu betreibende FireWire oder IEEE-1394-Bus hat gegenüber anderen Architekturen vor allem Geschwindigkeitsvorteile. Die derzeitige FireWire-Technolgie erreicht Übertragungsraten bis 1600 Mbit/s und wird offiziell unter der Bezeichnung IEEE-1394b geführt. Die Architektur dieser Spezifikation verspricht sogar eine Verdopplung der Übertragungsrate auf bis zu 3200 Mbit/s

Vergleich der Bussysteme

Im High-End-Bereich hat sich der VXI-Bus einen festen Platz in der industriellen Mess- und Prüftechnik erobert. Mit PXI wurde ein Schritt unternommen, die Verbreitung und die Leistungsfähigkeit des PCI-Bus für die Mehrheit der industriellen Mess- und Prüftechnik bereitzustellen. Er schließt somit die Lücke zwischen klassischer PC-Messtechnik und dem VXI-Bereich. Die unterschiedlichen Spezifikationen zusammengefasst zeigt Tabelle 5.2.

	GPIB	**VXI**	**PC-basierte Erfassung**	**PXI**
Busbreite	8	8, 16, 32	8, 16 ISA	8, 16, 32, 64
Datendurchsatz	1 Mbyte/s	40 Mbyte/s	1 - 2 Mbyte/s	132 - 264 Mbytes/s
Timing / Synchron	-	definiert	herstellerspez.	definiert
Verfügbare Geräte	>10000	>1000	>1000	neu
Erweiterbarkeit	möglich	MXI-Bus	herstellerspez.	PCI-Bridge
Größe / Abmessung	groß	mittel	klein	klein
Software	herstellerspez.	VXI-Plug&Play	herstellerspez.	definiert
Modularität	nein	ja	nein	ja
Kosten	hoch	mittel bis hoch	gering	gering bis mittel

Tabelle 5.2: Vergleich verschiedener Bus Systeme, (aus [16])

5.3.3 Datenanalyse

Im direkten Anschluss an die Messung von Daten folgt im Regelfall eine Weiterbearbeitung im Computer. Moderne digitale Fließkommasignalprozessoren sind in Echtzeit- und

Analysesystemen immer wichtiger geworden. Die Rohdaten, die aus dem Datenerfassungsgerät gelesen werden, enthalten nicht immer sofort verwertbare Informationen. Oft muss das Signal umgewandelt oder Rauschstörungen entfernt werden. Daten die durch fehlerhafte Ausrüstung verfälscht wurden oder Umgebungseffekte wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit müssen korrigiert werden.

Die Analyse-VIs von Labview decken die folgenden Hauptanwendungsgebiete ab:

- Digitale Signalverarbeitung
- Digitale Filterung
- Fensterung
- Statistische Analyse
- Kurvenanpassung
- Lineare Algebra
- Numerische Analyse

5.4 Konnektivität

In manchen Fällen sollen Daten mit anderen Programmen oder Anwendungen geteilt werden. LabVIEW verfügt über eingebaute Funktionen, die diesen Vorgang vereinfachen. Diese VIs erleichtern die Kommunikation über ein Netzwerk, rufen DDLs oder externen Quelltext auf und unterstützen ActiveX. Wird das SQL-Erweiterungs-Toolkit verwendet, kann LabVIEW auch mit den meisten SQL (Structured Query Language)-Datenbanken kommunizieren

5.4.1 DLL und CIN

LabVIEW kann externe, textbasierte Programmroutinen oder DLLs (Dynamic Link Libraries) aufrufen und diese in seine eigene Programmausführung einbinden. Eine DLL ist eine Bibliothek gemeinsamer Funktionen, die eine Anwendung während der Ausführung einbinden kann, nicht während der Kompilierung. Seit der Version 6i von LabVIEW gibt es die Möglichkeit, eine beliebige Labview Applikation in eine DLL zu konvertieren, um die Funktionen des LabVIEW VIs auch anderen Anwendungen, die beispielsweise in C++ oder Delphi programmiert wurden, zur Verfügung zu stellen.

5.4.2 ActiveX

Seit Version 5 von LabVIEW wird Microsofts ActiveX-Technologie unterstützt. Früher bekannt unter dem Namen OLE (Object Linking and Embedding) bekannt, wurde sie mit der Vorstellung von 32-Bit-Windows-Systemen erweitert. ActiveX ist der Sammelbegriff für eine Reihe verschiedener Möglichkeiten, wie Anwendungen untereinander kommunizieren können:

- ActiveX-Automation
- ActiveX-Controls
- ActiveX-Container
- ActiveX-Dokumente

5.5 Zusammenfassung

Die PC-orientierte Mess- und Regeltechnik (MSR) wächst ungleich stärker als der traditionelle Markt rund um den Bereich der monolithisch konzipierten Stand-alone-Geräte und Steuerungseinheiten. Integraler Bestandteil diese Wachstums ist unter anderem die Software, die sich immer mehr in Richtung der grafischen Programmierumgebung verlagert. Mit Hilfe einfacher grafischer Verknüpfungen kann der Anwender seine MSR-Aufgaben schnell und kostengünstig lösen.

LabVIEW und die Expresstechnologie verfolgen zwei Themenkomplexe. Zum einen geht es um die Art und Weise, wie eine Applikation unter LabVIEW erstellt wird. Die Ansätze Programmieren und Konfigurieren stehen nicht mehr im Widerspruch, sondern können je nach Kenntnisstand des Anwenders gewählt werden. Zum anderen sind Applikationen nun auf unterschiedliche Ziel-Hardwareplattformen wie PDAs und FPGA-basierten I/O-Karten ausführbar. Die Schritte Konfiguration der Messkarte, Starten und Darstellung der Messung, Analyse und Speichern der Messdaten, die bisher programmiert werden mussten, lassen sich nun über die „Express-VIs“ „on-the-fly“ konfigurieren.

Wie es für eine zeitgemäße Programmierumgebung üblich ist, bietet LabVIEW auch alle Debugmöglichkeiten, wie Haltepunkte, Einzelschrittausführung, animierte Programmausführung und gezielte Verfolgung von Variablenwerten.

LabVIEWs eingebaute Funktionen erleichtern Hardwarekommunikation mit externen Geräten, so dass keine komplizierten Programme dafür zu schreiben sind. Virtuelle Geräte können mit einer Vielzahl von Hardwarekomponenten arbeiten: DAQ-Einsteckkarten, GPBI-Karten, serielle Schnittstellen, PXI- und VXI-Schnittstellen sowie USB und FireWire.

LabVIEWs Analyse-VIs vereinfache es Daten zu bearbeiten und zu manipulieren. Anstatt Low-Level-VIs zu verwenden, kann auf vorgefertigte Lösungen zurück gegriffen werden, welche außerdem den eigenen Bedürfnissen angepasst werden können.

Die eingebauten Konnektivitäts-VIs LabVIEWs lassen vielfältige Möglichkeiten zur Kommunikation mit anderen, über Netzwerk verbundenen Computern oder Anwendungen auf demselben Computer zu. LabVIEW enthält VIs zur Unterstützung etlicher Netzwerkprotokolle, ActiveX-Kompatibilität und zum Aufruf von DLL oder externen, textbasierten Quelltextes.

Weiterhin besteht die Möglichkeit der Erzeugung externen Programmcodes in Form von DLL (Dynamic Link Libraries) oder EXE-Dateien (Executable). Diese ermöglichen es die Funktionalität eines LabVIEW-Programms auch anderen Anwendungen zur Verfügung zu stellen. (Aus [16, 20, 18, 21, 19])

Kapitel 6

Softwaresystem

6.1 Allgemeines

Das vorliegende Messprogramm wurde ursprünglich mit dem Ziel entwickelt, eine Messoberfläche nach DIN 45669 zu erstellen. Dabei sollten alle benötigten Anzeigen und Werte zu einer Erschütterungsmessung nach DIN 4150 T.2 enthalten sein.

6.1.1 Probleme

Mit der Erstellung des Softwaresystems sollten zwei hauptsächliche Probleme des letzten Messsystems gelöst werden:

Erstens erfordert die geforderte Frequenzbewertung nach DIN 45669 einen bestimmten Amplituden-Frequenz-Gang (HB-Soll). Dies setzt aber ein bekanntes und darauf abgestimmtes Übertragungsverhalten der Aufnehmer und der Messkarte voraus, das aber unzureichend bekannt ist. Meistens beschränken sich die Hersteller auf die Angabe eines Übertragungsfaktors bei bestimmten Frequenzen. Selbst wenn aber der genaue Amplituden-Frequenzgang jedes Aufnehmers exakt bestimmt würde, stellt sich die Frage, wie man diese Daten in einem Programm verwenden könnte. Die üblichen Messprogramme beschränken sich in den Einstellungen des Aufnehmer- und Messkartenverhaltens auf konstante oder lineare Faktoren der Form $Y = a * X + b$, wobei X das Eingangssignal des Aufnehmers ist, a der Übertragungsfaktor, b eine Korrektur des Offsets und Y die letztlich angezeigte Größe. Bei Messkarten und Beschleunigungsaufnehmern kann das Übertragungsverhalten bedingt linear betrachtet werden, bei Geschwindigkeitsaufnehmern handelt es sich hingegen um ein ausgesprochen nichtlineares Verhalten. Dies bedeutet, dass es nicht möglich ist mit dieser Korrektur eine große Genauigkeit zu erreichen.

Zweitens fordert die DIN 4150 als Messgröße die Geschwindigkeit. Dies bedingt eine große Anzahl dieses Aufnehmertyps, um Messungen mit vielen Kanälen zu gewährleisten. Geschwindigkeitsaufnehmer haben aber auf Grund ihrer Bauart ein schlechtes Übertragungsverhalten im unteren Frequenzbereich, neigen zu einer großen Verstärkung in der Nähe ihrer

ersten Eigenfrequenz (meist schon bei unter 10 Hz) und zur Abnahme der Sensitivität im Frequenzbereich oberhalb ihrer Resonanzfrequenz. Beschleunigungssensoren dagegen besitzen ein nahezu konstantes Übertragungsverhalten im gesamten Messbereich, da ihre Eigenfrequenz aufgrund der Bauart wesentlich höher liegt (mehreren 100 Hz). Außerdem besitzen sie einen finanziellen Vorteil in der Anschaffung verglichen mit Geschwindigkeitssensoren, welche ein ähnlich gutes Übertragungsverhalten gewährleisten. Es müssten also beide Aufnehmertypen in einer Messung verwendet werden können. Dies würde bedeuten, vor jeder Messung einzeln festzulegen, ob ein Kanal entsprechend der Konfiguration des Messsystems entweder zu integrieren oder zu differenzieren ist. Bisher ließ sich dies nur durch eine „feste“ Programmierung im Blockdiagramm erreichen. Bei einer Mehrkanalmessung ist dies ein erheblicher Aufwand, der sich noch vergrößert, sobald Aufnehmer während einer Messung getauscht werden müssen.

Zu Beginn der Entwicklung des Systems gab es also keine Möglichkeiten der programmatischen Korrektur des Aufnehmerübertragungsverhalten, sowie der Auswahl der Anzeige von Messgrößen abhängig vom Aufnehmertyp (Beschleunigung -> Geschwindigkeit -> Weg).

6.1.2 Lösung

Die Lösung wurde in Form einer Datenbank gefunden, in der einerseits alle zu verwendenden Aufnehmer mit ihrem Übertragungsverhalten, andererseits auch das Messsystemübertragungsverhalten abgespeichert werden können. Programmatisch können Einträge in diese Datenbank hinzugefügt und gelöscht werden.

Damit besitzt man vor einer Messung die Möglichkeit jedem Messkanal einen Aufnehmer zu zuweisen. Dies ermöglicht gezielte Korrekturen oder kanalweise, abhängig vom Aufnehmertyp, eine unterschiedliche Umwandlung der Messwerte.

Es stellen sich zwei Fragen:

- Was muss in dieser Datenbank enthalten sein und auf welche Art wird diese mit Werten gefüllt?
- Eine Integration oder Differentiation abhängig vom Aufnehmertyp lässt sich relativ leicht bewirken, aber wie kann das Aufnehmerübertragungsverhalten korrigiert werden?

Die erste Frage ist aufgrund der geforderten Eigenschaften schnell beantwortet. In der Datenbank müssen alle für einen Aufnehmer relevanten Informationen enthalten sein. Dies sind der interne Name des Aufnehmers (z.B. 2000-01), der Aufnehmertyp (Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Weg) und das Übertragungsverhalten des Sensors oder Messsystems. Als weitere Informationen sollen außerdem der Hersteller, das Sensormodell und die Herstellerseriennummer gespeichert werden.

Es musste also ein Programmmodul programmiert werden, in dem die Datenbankeinträge hinzugefügt, geändert oder entfernt werden können. Dafür sollte ein geeignetes Speicherformat gewählt werden, um später Daten gezielt (z.B. nach Aufnehmername) wieder einlesen zu können. Die Übertragungsfunktion des Aufnehmers oder Messsystems sollte sich entweder aus vorhandenen Kalibrierdaten (manuell durch Eingeben oder automatisch durch Einlesen) oder aus einer Messung bestimmen lassen.

Dieses Modul ist als Aufnehmerkalibrierung und Messkettenkalibrierung im Programm integriert. Als Datenbankformat wurde das binäre LabVIEW TDM-Format gewählt, da sich hier große Datenmengen mit Abfragen schnell und gezielt wieder einlesen lassen.

Der Entwicklungsprozess einer funktionierenden Korrektur der Messdaten war schwieriger und führte über mehrere Versuche. So wurden vorgegebene Filter und deren Kombination getestet sowie eigene Filterkoeffizienten berechnet. Dies führte aber nur zu unbefriedigenden Ergebnissen. Eine weitere Möglichkeit, Frequenzgänge zu korrigieren, stellt die Faltung (eine Operation im Zeitbereich) dar. Die erzielten Ergebnisse konnten aber auch nicht überzeugen. Die offensichtlich beste Methode ist eine Transformation des Zeitbereichssignals in den Frequenzbereich und eine Division des resultierenden Spektrums mit der Übertragungsfunktion des Aufnehmer oder Messsystems. Das Modul ist ebenfalls in das Programm integriert. Der scheinbar hohe Rechenaufwand führt zu keinerlei Problemen. Es ist ablaufinvariant, d.h. in mehreren Instanzen ausführbar, in das Programm eingebunden, da mehrere Korrekturen erforderlich sein können, beispielsweise an Messkarte und Aufnehmern.

6.2 Hauptprogramm

Das Programm wird vom SubVI „Start.vi“ geladen. Während die Unterprogramme des Hauptprogramms geladen werden, zeigt das Unterprogramm „Start.vi“ den aktuellen Fortschritt an. Im Hauptprogramm befinden sich alle Unterprogramme, die Hauptmessoberflächen, die Kanalkorrektur, die Grundeinstellungen sowie zwei getrennte Schleifen zur Behandlung der Abläufe der Benutzeroberfläche und des Programmablaufs. Weiterhin wird hier auch die Programm-, Aufnehmer- und Messkettenkonfiguration eingelesen und an die Unterprogramme weitergegeben.

6.2.1 Frontpanel

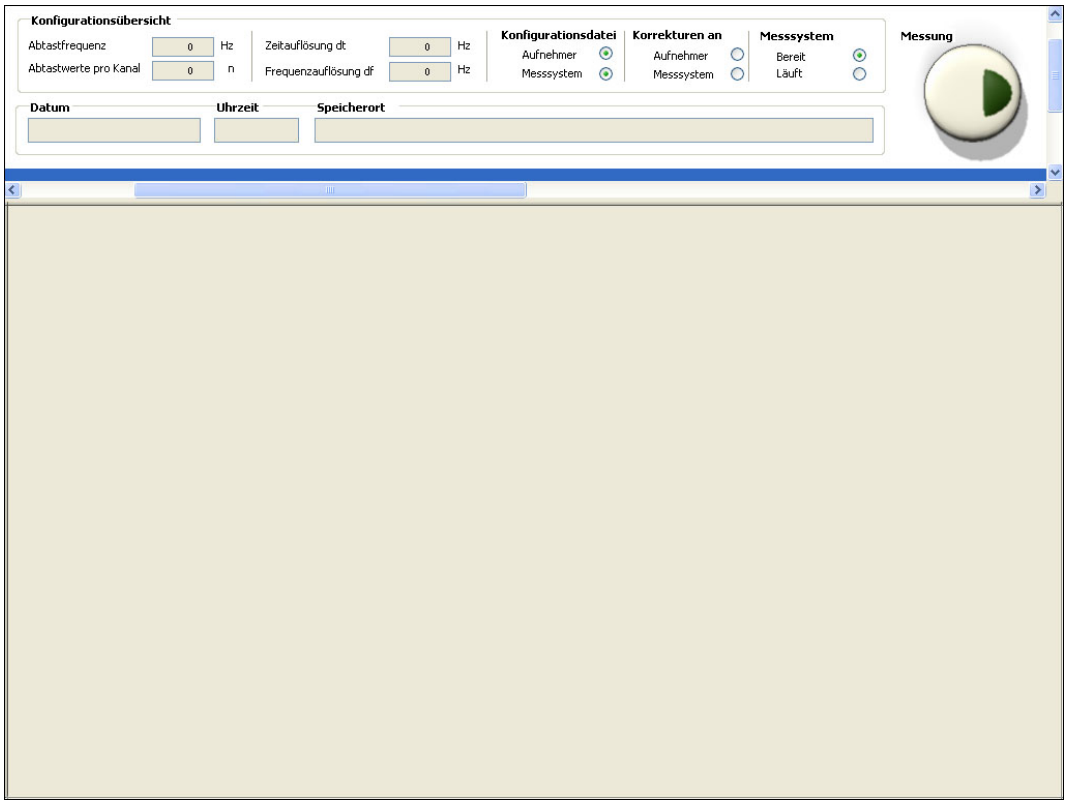


Abbildung 6.1: Hauptprogramm, Frontpanel

Abb. 6.1 zeigt die Hauptbenutzeroberfläche des Programms. Im oberen Bereich finden sich Statusanzeigen über die aktuelle Konfiguration des Programms und die „Messung Starten"-Schaltfläche. Im unteren Bereich befinden sich die Anzeigen der Messwerte. Hier erscheint je nach gewählter Messmethode eine andere Anordnung von Anzeigeelementen.

In der Menüleiste des Programms finden sich die Punkte *Datei*, *Einstellungen*, *Report* und *Erweitert*.

- Im *Datei*-Menü lässt sich eine *Neue* Datei zum Speichern von Messwerten erstellen. Mit *Beenden* wird das Programm nach vorheriger Rückfrage geschlossen.
- Im *Einstellungen*-Menü können die *Grundeinstellungen* festgelegt werden. Desweiteren gibt es hier die Module zu Aufnehmer- und Messsystemsteuerdateibearbeitung und zur Aufnehmer- und Messkettenkalibrierung.
- Das Menü *Report* ist aktuell noch ausgeblendet, da das entsprechende Modul noch nicht funktioniert.

- Im Menü *Erweitert* finden sich die Unterprogramme *HB-Soll-Test*, *Messstatistik* sowie Hilfeanzeigen und Programminformation.

6.2.2 Funktionsweise

Beim Start des Programms wird überprüft, ob sich eine Programm-Konfigurationsdatei im Ordner „Steuerdateien“ befindet. In dieser Datei werden alle relevanten Programminformationen gespeichert. Sollte keine Steuerdatei gefunden werden, wird eine neue Datei erstellt. Weiterhin überprüft das Programm, ob die Aufnehmer- und Messsystem-Steuerdateien geladen werden können. Wenn ja, werden sie geöffnet und eine Referenz an das Programm weitergegeben. Der hauptsächliche Unterschied zu anderen Programmen ist hier die getrennte Behandlung von Benutzerereignissen in einer Schleife und Messtechnik in einer anderen. Ein großes Problem bei tieffrequenten Messungen ist die zur Auflösung des Frequenzbereichs nötige, lange Abtastdauer. Während dieser Zeit kann ein Programm, welches aus nur einer Schleife besteht, keine anderen Prozeduren abarbeiten. Diese Problematik ist somit umgangen. Der Datenaustausch zwischen diesen zwei Schleifen geschieht über lokale Variablen. So wird eine Messung zwar vom Nutzer in der Steuerschleife gestartet und beendet, aber der eigentliche Stop findet erst dann statt, wenn die Messschleife ihr “OK“ gibt.

Die GUI-Schleife enthält alle Elemente mit denen der Nutzer in Interaktion tritt. Dies sind z.B. die Menüüberwachung und Auswertung, alle Bedienelemente auf dem Frontpanel sowie die SubVIs für Einstellung, Kalibrierung, HB-Soll-Test und Statistik. Desweiteren wird auch die Online- und die Programmhilfe von hier aus gestartet.

Die Messschleife enthält die SubVIs zum Starten des Messtasks, die Aufnehmerkorrektur, die Frequenzbewertung, die Korrektur der Messgröße durch Integration oder Differentiation, verschiedene Unterprogramme zum Anzeigen der unterschiedlichen Messoberflächen sowie die Datenspeicher VIs.

6.3 Unterprogramme

In diesem Abschnitt sollen alle größeren wichtigen Unterprogramme für das Messsystem näher erläutert werden. Dabei werden nur Unterprogramme vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind.

Alle hier vorgestellten Unterprogramme werden als SubVIs in das Programm eingebunden, d.h. sie besitzen einen Anschlussblock zur Kommunikation mit dem Hauptprogramm. Darüber erhalten sie alle für ihre Ausführung nötigen Parameter und Daten. Meist besitzen sie ein Frontpanel, welches nach dem Start aufgerufen wird und bei beendigen des Unterprogramms wieder geschlossen wird. Das Korrektur-VI, die HB-Soll Frequenzbewertung und

einige andere SubVIs besitzen allerdings kein Frontpanel, da sie nur interne Aktionen ohne Nutzerinteraktion erledigen.

6.3.1 Grundeinstellungen

In diesem Unterprogramm können alle Einstellungen für das Hauptprogramm und die Unterprogramme getroffen werden. Es untergliedert sich in drei Teile:

Messprogrammeinstellungen

Hier werden die hauptsächlichen Einstellungen für die Funktionsweise des Hauptprogramms getroffen (Abb.: 6.2). So kann festgelegt werden auf welcher Norm die Messung basiert. Dementsprechend ändern sich im Unterpanel des Hauptprogramms die Anzeigewerte und bestimmte Parameter wie Mittelwertbildung, Frequenzbewertung und z.B. die Art des Speicherns von Daten. Diese Parameter können aber auch manuell in dieser und in der nächsten Registerkarte *Taskeinstellungen* „überschrieben“ werden. Im unteren Bereich lässt sich der Messmodus festlegen. Dies funktioniert aber nur, wenn in der Registerkarte Taskeinstellungen auch jedem Kanal ein Aufnehmer zugeordnet ist. Ansonsten kann das Modul zur Kalibrierung nicht bestimmen um welchen Aufnehmertyp es sich handelt.

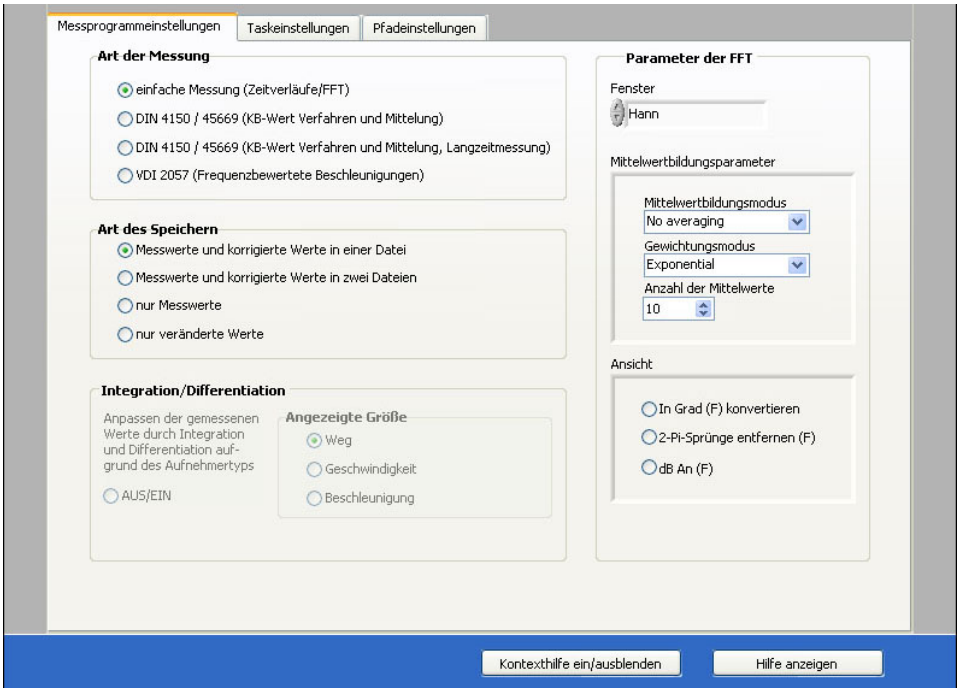


Abbildung 6.2: Grundeinstellungen - Programm, Frontpanel

Taskeinstellungen

In diesem Reiter, Abb.: 6.3, werden alle Einstellungen, die die Messung betreffen, festgelegt. Im oberen Teil können Einstellungen des Messtasks, der Abtastrate und der Abtastdauer getroffen werden. Im linken unteren Bereich können vier verschiedene Typen von Butterworth-Filtern dritter Ordnung konfiguriert werden: ein Hoch- und ein Tiefpass, ein Bandpass und ein Bandstop. Die wichtigste Konfiguration lässt sich aber in dem Unterpanel auf der rechten Seite einstellen - die Aufnehmerzuordnung zu den Kanälen. Dazu werden alle in der Datenbank vorhandenen Aufnehmernamen eingelesen und in den „pull-down"-Menüs zur Verfügung gestellt. Mit dem Schalter „Aktivieren" lässt sich die Korrektur einschalten. Dieselbe Prozedur vollzieht sich auch für die Korrektur des Messsystems.

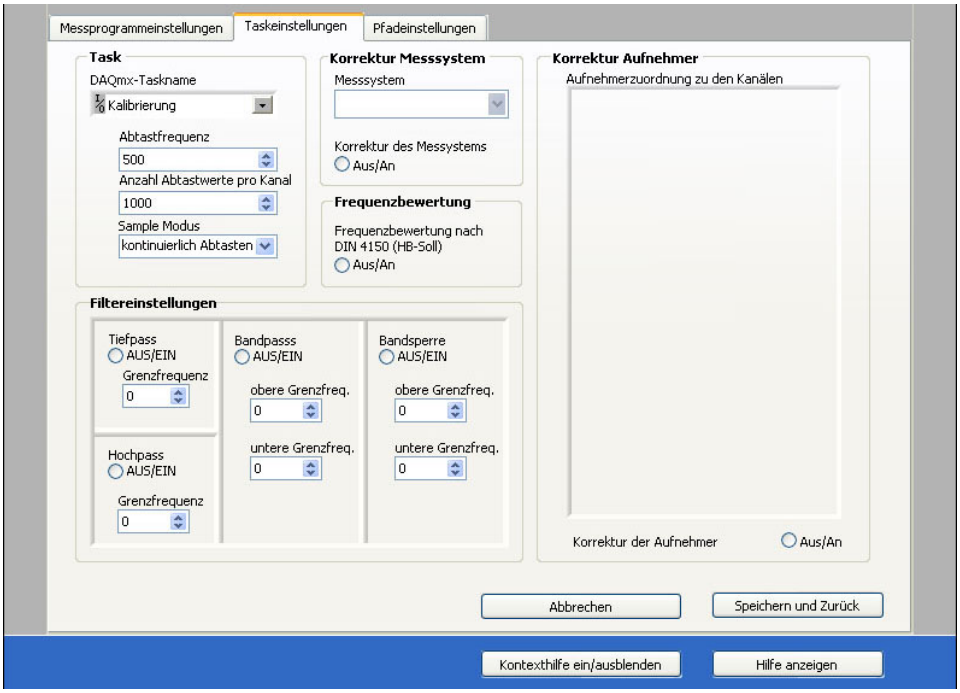


Abbildung 6.3: Grundeinstellungen - Taskeinstellungen, Frontpanel

Pfadeinstellungen

In dieser Oberfläche (Abb.: 6.4) werden die Pfade zu einzelnen Programmkomponenten angezeigt oder können geändert werden.

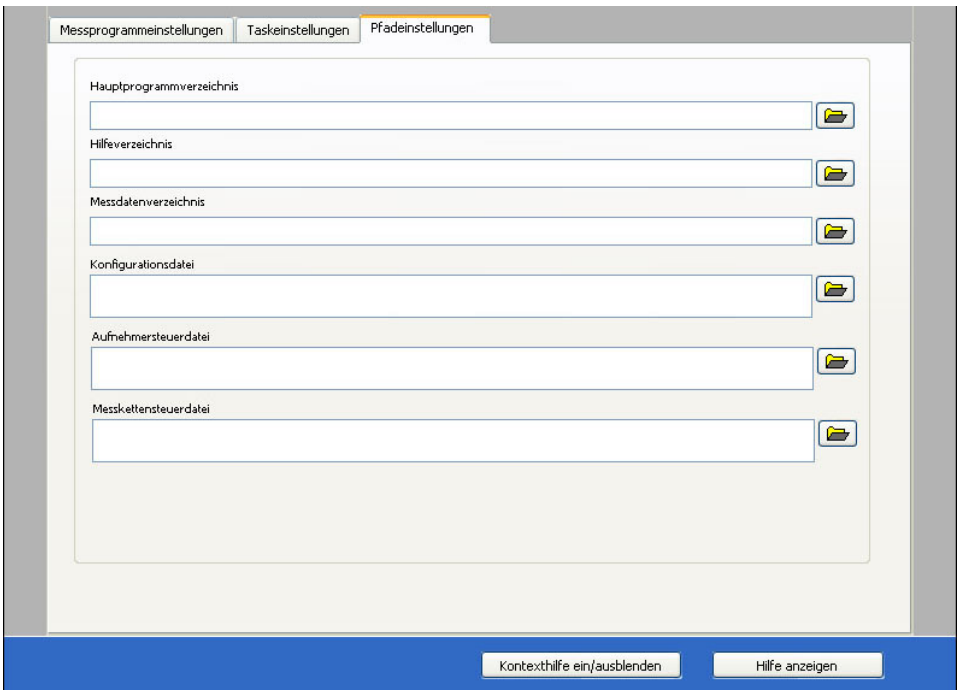


Abbildung 6.4: Grundeinstellungen - Pfadeinstellungen, Frontpanel

6.3.2 Kanalkorrektur

Die Eingänge des Sub-VIs sind die Kanalnamen, eine Referenz auf die Aufnehmersteuerdatei, die zu korrigierenden Kanäle, ein „Aktivieren“-Schalter und der allgemeine Fehlerbehandler. Ausgänge sind die korrigierten Kanäle, die unkorrigierten Kanäle, die einzelnen verwendeten Übertragungsfunktionen, die Referenz auf die Aufnehmersteuerdatei und der Fehlerbehandler. Das VI liest die Übertragungsfunktionen der Aufnehmer aus der Steuerdatei nach Auf-

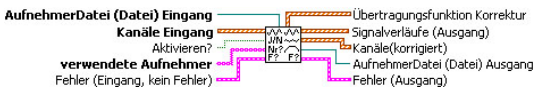


Abbildung 6.5: Kanalkorrektur, Anschlussblock

nehmername ein und korrigiert, wenn dies aktiviert ist, die einzelnen Kanäle mit der Übertragungsfunktion des jeweiligen Aufnehmers. Dies geschieht durch eine Fourier-Transformation des gemessenen Eingangssignals, eine Division der Einzelwerte des Spektrums durch die den jeweiligen Frequenzen entsprechenden Amplitudenwerte der Übertragungsfunktion aus der Datenbank und eine inverse FFT. Da es sich um unterschiedlich Eingangssignale handeln kann, muss vorher geprüft werden ob das dt der ÜF und des Spektrums sowie die Signalverlaufslänge gleich sind. Wenn die Signalverläufe unterschiedliche Abtastraten besitzen,

wird die Übertragungsfunktion derart „abgeschnitten“, dass die höchsten Frequenzen beider Signale gleich sind. Danach wird überprüft, ob dieselbe Anzahl von Wertepaaren in beiden Spektren vorhanden ist. Sollte dies nicht der Fall sein interpoliert das VI zusätzliche Zwischenwerte oder entfernt überzählige vorhandene. Würde man das VI nicht als Unterprogramm ausführen, sondern z.B. zur nachträglichen Signalkorrektur an einer vorhandenen Zeitreihe, müsste man immer blockweise Werte einlesen, korrigieren und danach die Ergebnisse wieder zu einem neuen Signalverlauf zusammenfügen. Dies ist hier aber nicht nötig, da bei einer Frequenzauflösung von $0,1Hz$ jede Abtastung 10 Sekunden dauert. Deshalb bleibt für die Korrektur genug Zeit und es gibt keine Lücken im Signalverlauf. Im darge-

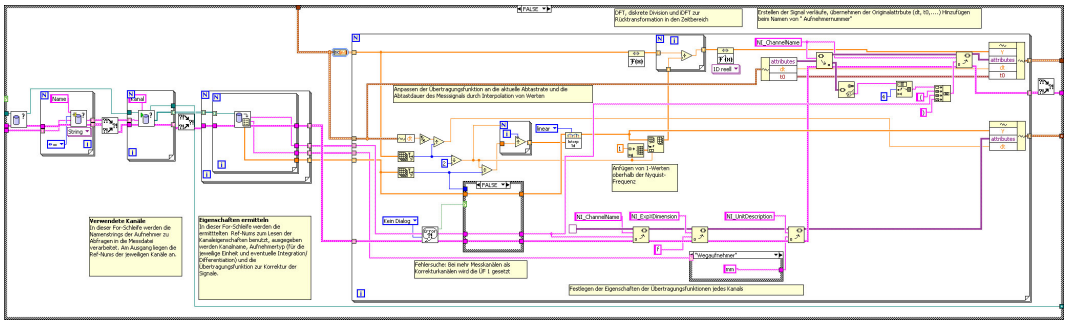


Abbildung 6.6: Kanalkorrektur, Blockdiagramm

stellten Blockdiagramm (Abb.: 6.6) kann man den „Case“ des Falldiagramms erkennen, der ausgeführt wird, wenn das Programm aktiviert ist. Im linken Bereich werden die Abfragen an die Aufnehmer-Datenbank durchgeführt. Oben ist die Trennung von unkorrigiertem und korrigiertem Eingangssignal zu erkennen. In der Mitte befindet sich die Korrektur (FFT / Division / IFT), im unteren Bereich die Signalüberprüfung und Neuabtastung. Im rechten Auschnitt werden die Werte wieder zu einem Signalverlauf mit den Eigenschaften des Eingangssignals (Zeitstempel, Kanalname, dt) umgewandelt. Dem Kanalnamen wird entweder der Name des Messsystems oder des korrigierten Aufnehmers in Klammern angehangen. Sollte der Fall auftreten, dass bei aktivierter Korrektur für einen Kanal kein Aufnehmer gewählt wurde, korrigiert das VI den Kanal mit dem Wert 1 und hängt dem Kanalnamen den Wert „(nicht korrigiert)“ an.

6.3.3 Messstatistik

In diesem Modul (Abb.: 6.7) werden aktuelle Daten (Anzahl der Samples, Wartemodus etc.) über den Messtask angezeigt. Die Aktualisierungsgeschwindigkeit ist gleich der Abtastdauer (Anzahl Samples/Abtastrate) der Messung.

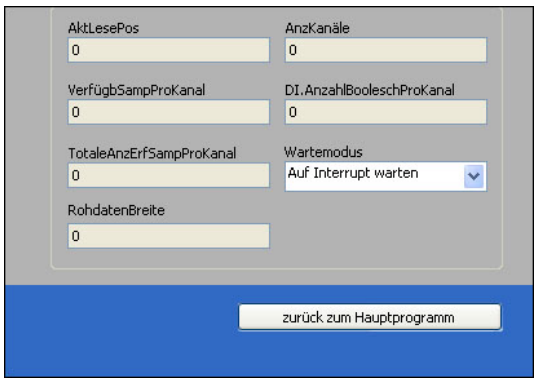


Abbildung 6.7: Messstatistik, Frontpanel

6.3.4 HB-Soll-Test

In diesem Modul (Abb.: 6.8) kann das gemessene mit dem korrigierten Signal verglichen werden. Das Programm zeigt allerdings nur den letzten Block an gemessenen Daten an (abhängig von der Anzahl der erfassten Samples). Im Kanalumschalter lässt sich die Anzeige zwischen mehreren Kanälen umstellen. Auf der Konfigurationsoberfläche können die unterschiedlichen Grenzwerte der Genauigkeitsklassen nach DIN 45669 betrachtet und geändert werden. Zum Ändern wird ein weiteres SubVI aufgerufen, welches die Grenzwertberechnung durchführt und eine Datei Klassengrenzen.lvm im Ordner Steuerdateien erzeugt. Diese wird wiederum vom HB-Soll-Test-VI eingelesen.

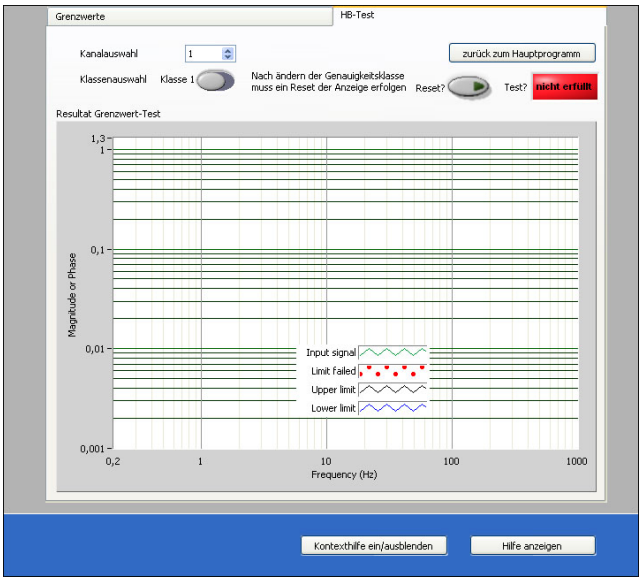


Abbildung 6.8: HB-Soll-Test, Frontpanel

6.3.5 Messkettenkalibrierung

In diesem Unterprogramm können Kalibriermessungen durchgeführt und Datensätze zur Messkettensteuerdatei hinzugefügt werden. Die „endgültige“ Übertragungsfunktion lässt sich durch tabellarische Eingabe oder durch eine Messung Referenz einer Referenzspannungsquelle bestimmen. Nach Ermittlung dieser Funktion wird diese der Steuerdatei mit dem Messsystemnamen, dem Hersteller, der Herstellerseriennummer und dem Typ der Steuerdatei hinzugefügt.

Erfassen

Dies ist die Messoberfläche dieses Moduls. Es können Einstellungen zum Task gemacht und Messwerte erfasst werden (Abb.: 6.9). Im unteren Bereich befindet sich wie bei allen Hilfsprogrammen der Bereich zum Einblenden der Kontexthilfe und der Hilfedatei. Durch Starten der Messung wird die Registerkartenleiste ausgeblendet und die „Weiter“-Schaltfläche deaktiviert. Durch den Reset des Maxwert-Speichers kann eine Messung zurückgesetzt werden. Standardmäßig befinden sich die Maximalwerte bis zum Programmende im Maxwertspeicher der FFT. Das heißt, es lassen sich unterbrochen Messungen auch wieder fortsetzen, ohne dass wieder dieselben Frequenzen angefahren werden müssen.

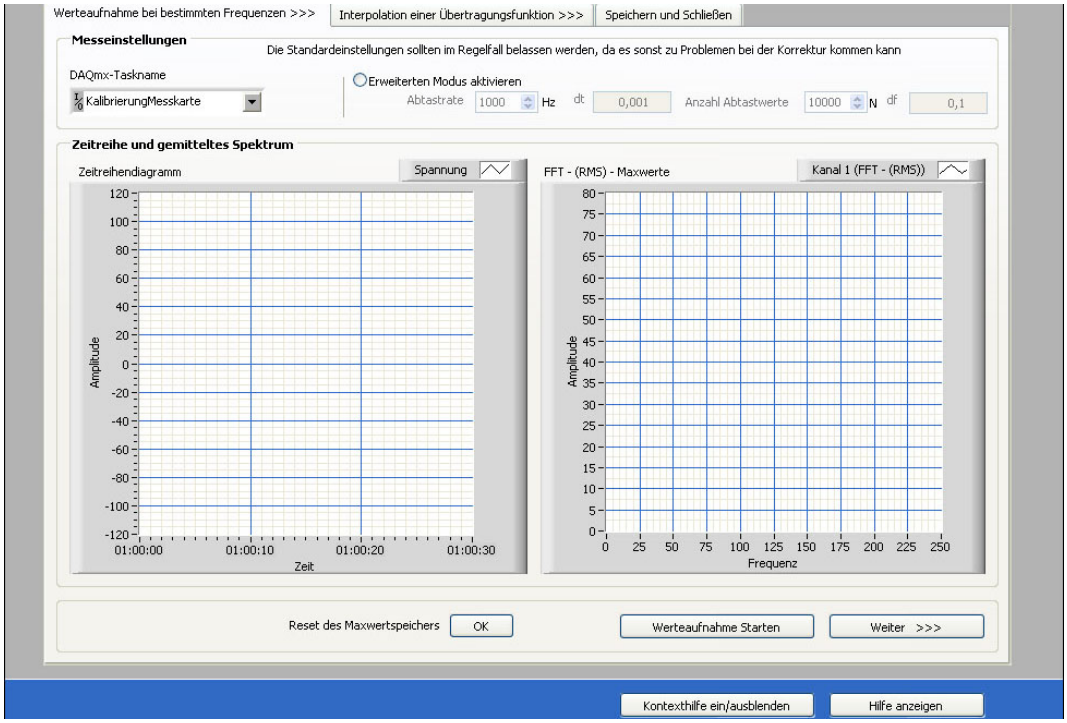


Abbildung 6.9: Messkettenkalibrierung - Erfassen, Frontpanel

Interpolieren

Auf dieser Registerkarte (Abb.: 6.10) erfolgt nach vorheriger Spitzenwerterkennung die Interpolation der Werte zu einer Übertragungsfunktion mit einem $df = 0,1Hz$. Es lassen sich allerdings auch Werte manuell eingeben. Dies ist praktisch bei Werten aus früheren Kalibrierungen, die in Papierform vorliegen. Weiterhin lassen sich Wertepaare auch aus einer Datei einlesen oder in eine Datei speichern. Das Ergebnis der Interpolation wird an die nächste Registerkarte „Speichern“ übergeben.

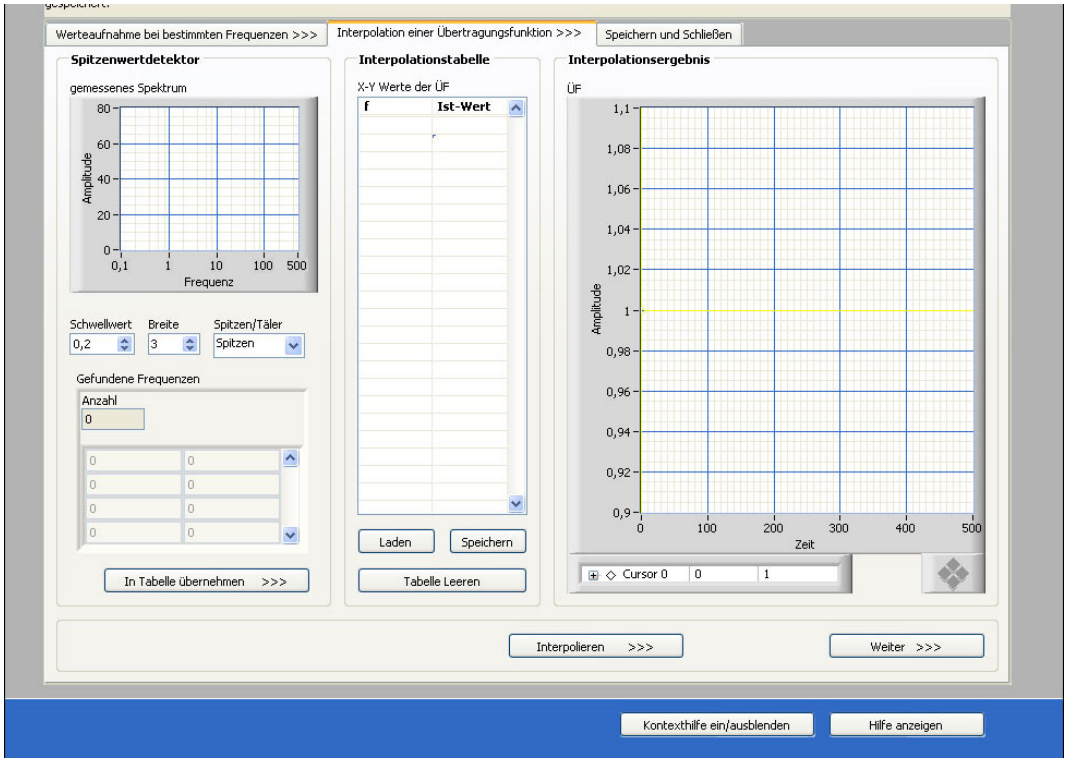


Abbildung 6.10: Messkettenkalibrierung - Interpolieren, Frontpanel

Speichern

In diesem Teil werden die interpolierten Daten in die interne Messsystem-Datenbank (Steuerdateien -> KalibrierungMesskarte) gespeichert. Es können auch alte Datensätze überschrieben werden, wenn der Name eines Messsystems gewählt wird, der schon in der Datenbank vorhanden ist. Dies lässt sich auf der linken Seite erkennen (Abb.: 6.11). Dabei müssen die Angaben in der Eingabemaske immer vollständig ausgefüllt werden, da sonst nichts gespeichert wird. Das Programm kann durch „Abbrechen“ oder „Speichern und Beenden“ geschlossen werden. In beiden Fällen wird vor dem Beenden nachgefragt.

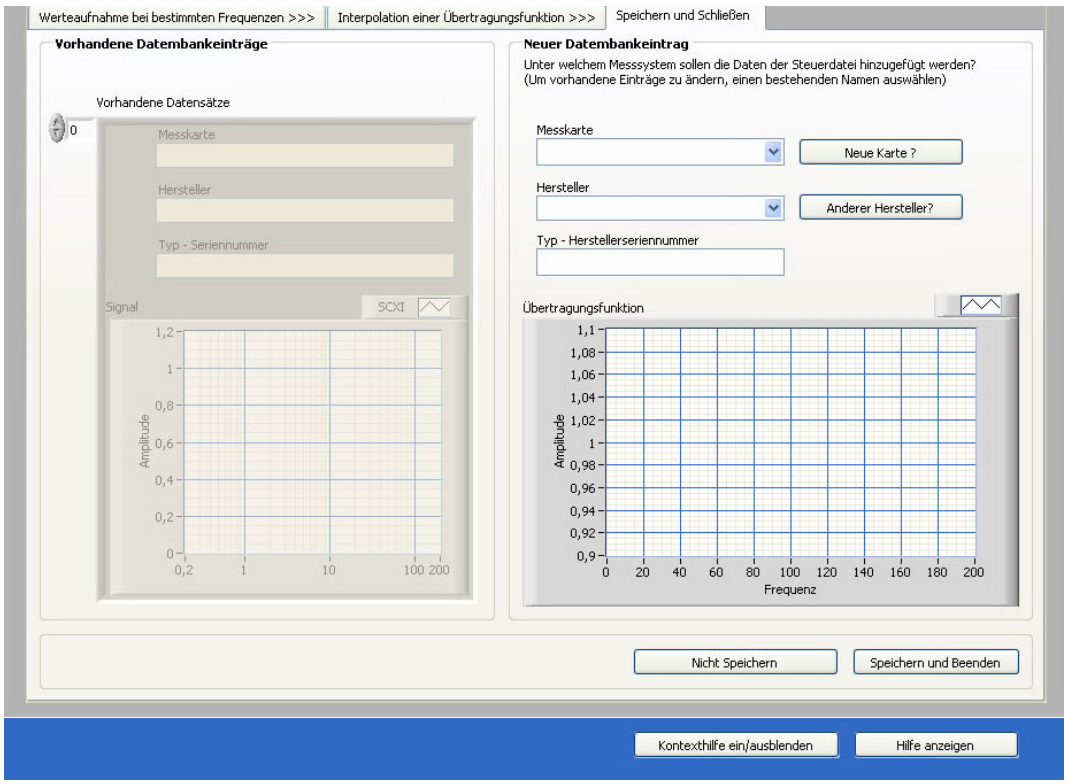


Abbildung 6.11: Messkettenkalibrierung - Speichern, Frontpanel

6.3.6 Messsystemsteuerdatei ändern

In diesem Unterprogramm können gezielt Datensätze aus der Messsystemsteuerdatei gelöscht, hinzugefügt oder geändert werden. Dabei beschränken sich die Manipulationen an der Datenbank auf Änderungen an den Eigenschaften der Aufnehmer. Anders gesagt: es kann alles manipuliert werden außer der Übertragungsfunktion des Datensatzes. Der Schlüssel ist dabei der Messkartenname. Wird ein Eintrag unter einem schon vorhandenem Namen gespeichert, werden alle Eigenschaften dieses Eintrags überschrieben. Es können jedoch komplette Datensätze gelöscht werden. Aufgrund der Architektur der TDM-Files können nach dem Löschen von Daten erst nach Schließen der Datei, also einem Programmneustart, wieder Schreibvorgänge ausgeführt werden. Das heisst, das Löschen von Daten muss immer nach der Bearbeitung anderer Daten erfolgen.

6.3.7 Aufnehmerkalibrierung

Das Modul Aufnehmerkalibrierung ermöglicht alle Vorgänge, die nötig sind, um das Aufnehmerübertragungsverhalten zu messen oder manuell einzugeben. Aus diesen Werten wird

nach einer etwaigen Korrektur mit einer Referenz eine Übertragungsfunktion interpoliert und diese dann in die interne Datenbank gespeichert. Dabei müssen alle Informationen in der Eingabemaske ausgefüllt werden. Dieses VI ist das komplexeste Unterprogramm des Softwaresystems.

Konfiguration

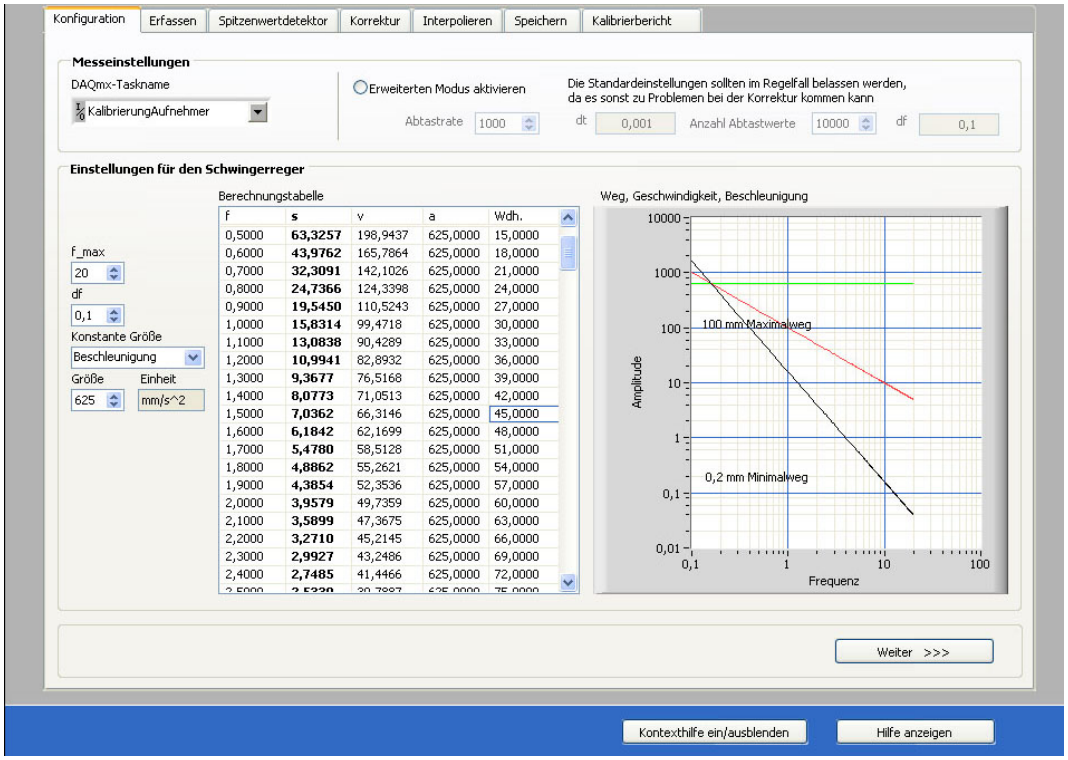


Abbildung 6.12: Aufnehmerkalibrierung - Konfiguration, Frontpanel

Auf dieser Oberfläche (Abb.: 6.12) werden allgemeine Einstellungen zur Messung festgelegt, wie Taskname, Abtastrate und Anzahl der Samples. Außerdem befindet sich im unteren Teil des Frontpanels ein Hilfsmittel zur Berechnung der Wegamplituden des Schwingerregers abhängig von der Frequenz. Dabei wird entweder eine konstante Geschwindigkeit oder Beschleunigung angenommen. Außerdem gibt die Tabelle Aufschluss über die Anzahl von Wiederholungen einer Schwingung bei einer Frequenz, um eine gleichlange Messzeit zu erreichen. Die angesetzte Messzeit bestimmt sich aus $n * dt * 3$ in Sekunden. Wobei n gleich die Anzahl von Samples und dt die Zeitauflösung ist, das heißt die Dauer einer Erregung bei einer bestimmten Frequenz beträgt immer drei Messtakte.

Erfassen

Abbildung 6.13 zeigt die Messoberfläche des Programms. Auf dem Frontpanel werden die Zeitverläufe und Spektren der Signale dargestellt. Es existiert ein „Reset“-Knopf zum Löschen des Maximalwertspeichers der FFT. In der Aufnehmerauswahlleiste kann der darzustellende Kanal ausgewählt werden. Bei Umschalten der Aufnehmerauswahl vergeht aber bis zu ein Messtakt zur Aktualisierung der Programmanzeigen. Wenn die Messung gestartet wurde, werden die „Weiter“-Schaltfläche und die Registerkartenleiste deaktiviert.

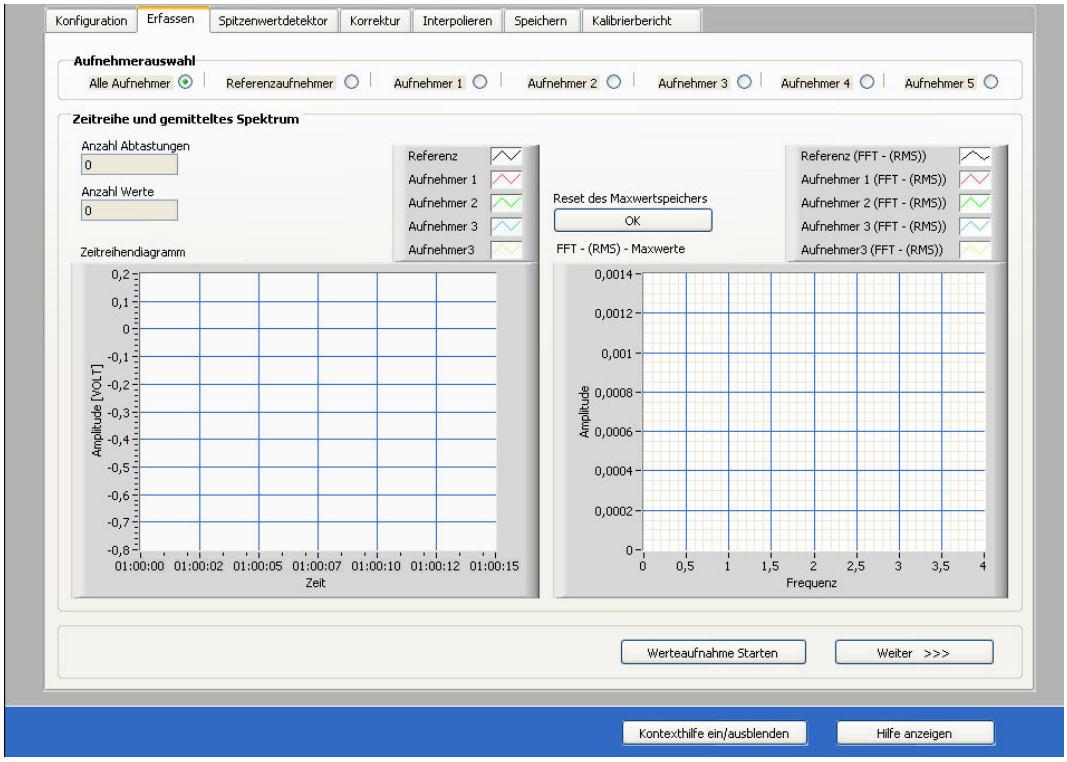


Abbildung 6.13: Aufnehmerkalibrierung - Erfassen, Frontpanel

Spitzenwertdetektor

Im Teil „Spitzenwertdetektor“ (Abb.: 6.14) des Programms gibt es zwei Möglichkeiten die Amplituden zu den angefahrenen Frequenzen zu ermitteln: entweder durch die manuelle Eingabe von Frequenzen und die automatische Berechnung der zugehörigen Amplituden oder durch ein automatisiertes Unterprogramm. Der Vorteil dieses Programms ist die Schnelligkeit, der Nachteil liegt in der mangelnden Erkennung eng beieinander liegender Frequenzen. Dabei handelt es sich ja eigentlich auch nicht um „Spitzen“, sondern eher um „Buckel“. In solchen Situatuionen muss auf die manuelle Erkennung zurück gegriffen werden.

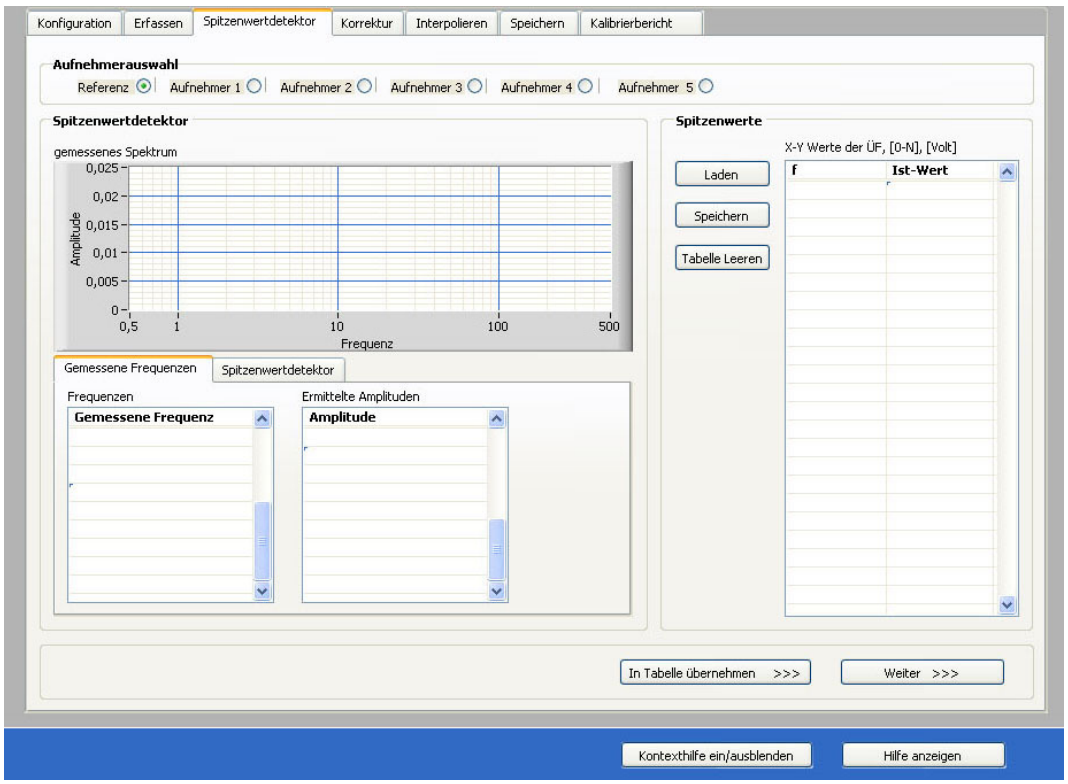


Abbildung 6.14: Aufnehmerkalibrierung - Spitzenwertdetektor, Frontpanel

Korrektur

Aus dem Spitzenwertdetektor in die Korrekturoberfläche (Abb.: 6.15) übernommene Werte werden automatisch in die richtigen Tabellen übernommen, auf dieser Oberfläche ist nur in dem „pull-down“ -Menü links oben auszuwählen, welcher Aufnehmer als Referenz (Kanal 0) gilt. Entscheidend ist natürlich, dass sich ein Datenbankeintrag zu diesem Aufnehmer finden lässt. Dadurch werden die vorhandenen Daten der Referenz in die zweite Tabelle eingetragen. Die Korrektur der Messwerte erfolgt sobald ein Referenzaufnehmer gewählt wurde.

Zur Korrektur des gemessenen Signals eines nicht kalibrierten Aufnehmers mit dem einer Referenz werden zuerst die gemessenen Werte der Referenz (mV) durch die zugehörigen Werte der Übertragungsfunktion der Referenz geteilt ($mV/mm/s$ oder $mV/mm/s^2$). Es entsteht eine Funktion der realen Messgröße (mm/s oder mm/s^2) abhängig von der Frequenz. Abschließend werden die gemessenen Werte aller Aufnehmer durch diese Funktion geteilt. Es entsteht dadurch die Übertragungsfunktion jedes Aufnehmers ($mV/mm/s$ oder $mV/mm/s^2$).

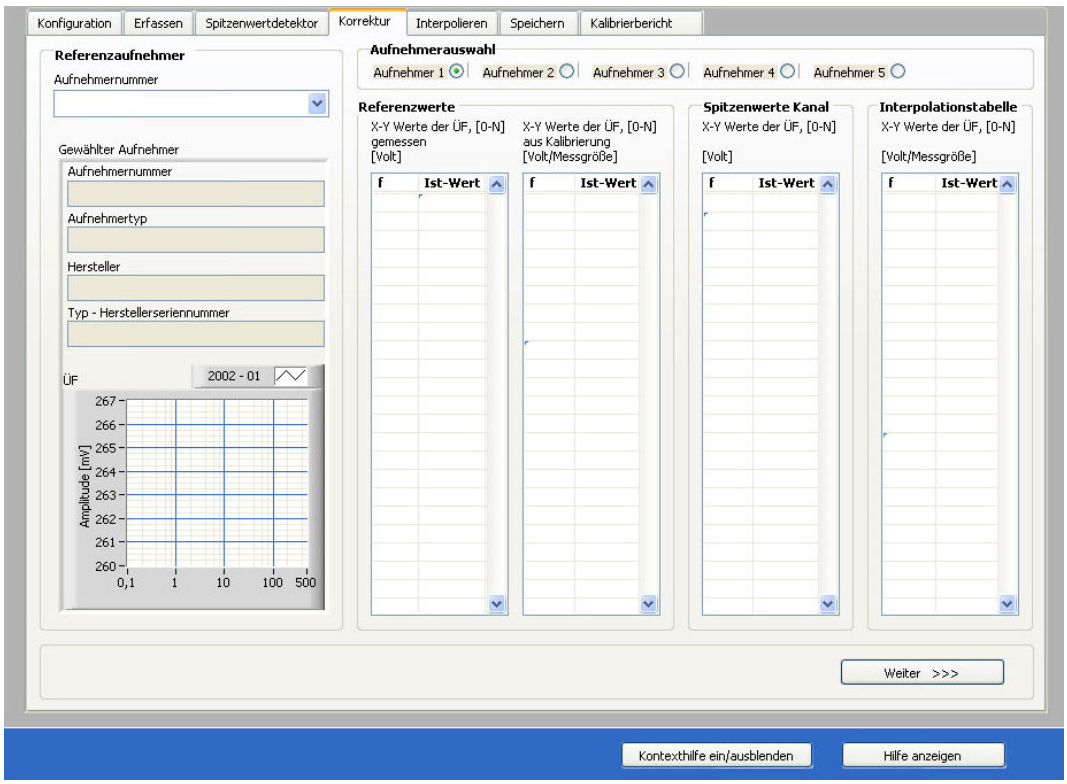


Abbildung 6.15: Aufnehmerkalibrierung - Korrektur, Frontpanel

Interpolieren

Die Interpolationsoberfläche (Abb.: 6.16) beinhaltet eine Tabelle mit den Frequenz-Amplituden-Werten der Übertragungsfunktionen aller gemessenen Aufnehmer. Die Darstellung ist abhängig von dem in der Aufnehmerauswahl eingestellten Aufnehmer. Es lassen sich aber auch problemlos Wertepaare z.B. einer Herstellerkalibrierung manuell eintragen. Desweitern besteht die Möglichkeit Werte aus einer Datei zu laden und in eine Datei zu speichern. Mit „Übernehmen“ werden diese Werte aus der Tabelle mit einem $df = 0,1$ interpoliert und im Graph angezeigt. Durch die problematische Art der Werteübernahme aus einem Array lassen sich einmal interpolierte Funktionen in diesem Graphen nicht mehr anzeigen. Es ist aber möglich sich die Graphen in der „Speichern“ Oberfläche anzusehen. Außerdem kann aus der Tabelle beliebig oft neu interpoliert werden. Beim Interpolieren ist darauf zu achten, dass der Übertragungsfaktor des größten Frequenzwertes (typischerweise 16 Hz) der Oberfrequenz von 500 Hz zugeordnet wird. Dies stellt nur eine grobe Näherung dar, ermöglicht aber die spätere Korrektur nicht nur im tieffrequenten Bereich bis $16Hz$. Nachdem alle Aufnehmer-Tabellenwerte in Graphen „umgewandelt“ sind, können sie gespeichert werden.

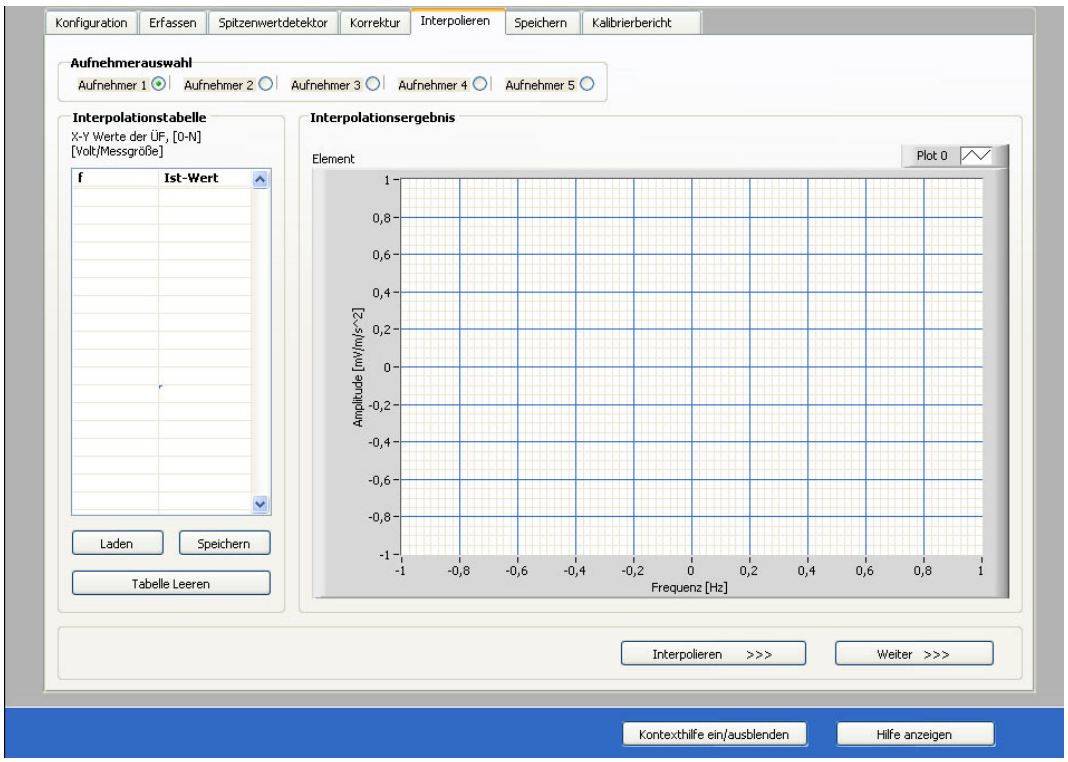


Abbildung 6.16: Aufnehmerkalibrierung - Interpolieren, Frontpanel

Speichern

In diesem Teil des Programms (Abb.: 6.17) können den Übertragungskurven der Sensoren die internen Namen (Schema: Jahr+nn), ein Aufnehmertyp (Messgröße), ein Hersteller, ein Modell und eine Seriennummer zugewiesen werden. Mit „Abbrechen“ wird das Programm ohne Speichern, durch „Beenden“ mit Speichern der Daten geschlossen. Es erfolgt in jedem Fall eine Rückfrage des Programms. Sollten Aufnehmer unvollständig ausgefüllte Daten besitzen, wird ebenso nachgefragt. Aufnehmer ohne oder mit nur unvollständigen Daten werden generell nicht gespeichert.

Kalibrierbericht

Auf dieser Oberfläche (Abb.: 6.18) befinden sich zahlreiche Eingabeelemente zur Beschreibung der Konfiguration einer Messung. Die Werte dieser Elemente werden zusammen mit den Daten des in der Auswahlleiste eingestellten Aufnehmers in ein Wordtemplate an durch Textmarken definierte Stellen übertragen sobald „Report erstellen“ betätigt wird. Das Template muss sich in dem Ordner Reportvorlagen befinden.

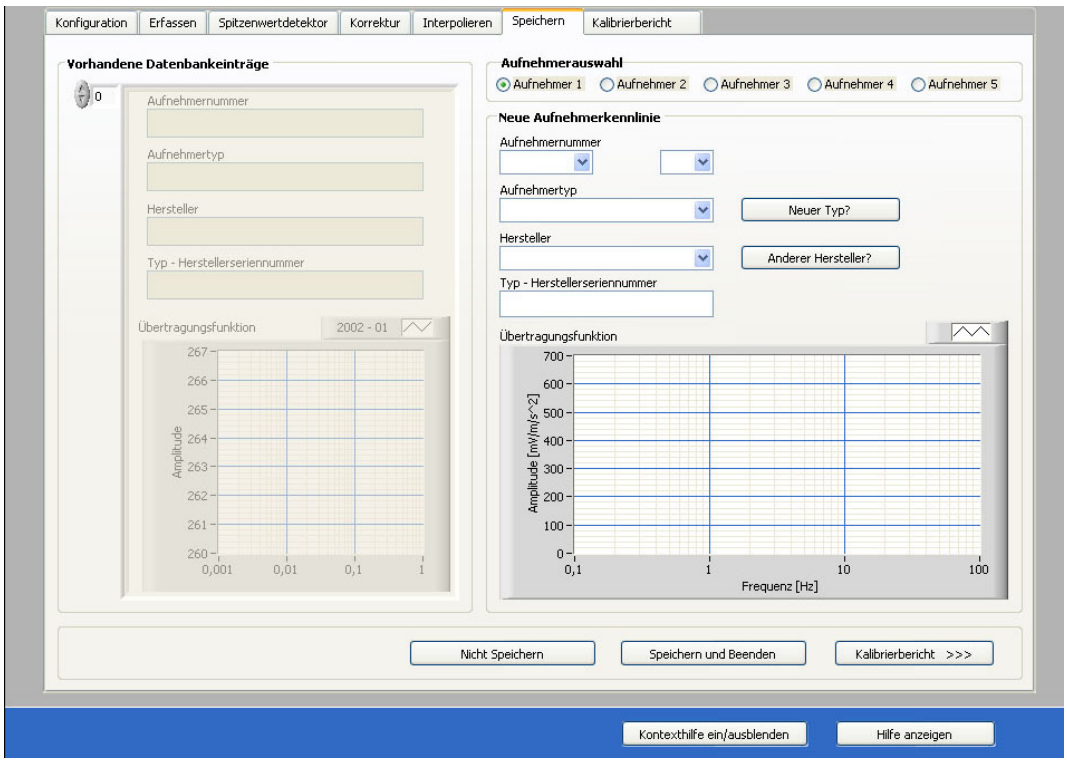


Abbildung 6.17: Aufnehmerkalibrierung - Speichern, Frontpanel

6.3.8 Aufnehmersteuerdatei ändern

Die Funktionsweise dieses Programms ist gleich der des Programms zum Ändern der Messsystemsteuerdatei. Das heißt, es können neue Einträge angelegt, bestehende modifiziert oder gelöscht werden.

6.4 Hilfefunktion

LabVIEW ist mit einem umfassenden System zur Hilfeerstellung ausgestattet. So kann man jedem Element des Programms, unabhängig ob Frontpanel- oder Blockdiagrammobjekt, sogenannte Tooltips und Beschreibungen zuweisen. Ein Tooltip erscheint, wenn die Maus über ein Objekt bewegt wird. Die Beschreibung erscheint zeitgleich in der Kontexthilfe. Aus diesen Beschreibungen lässt sich dann eine Dokumentation des Programms im Rich-Text-Format erstellen. Mit Hilfe des MS-Help-Workshop kann man RTF-Dateien in Windows-Hilfe-Dateien (*.hlp) compilieren. Eine weitere Möglichkeit der Erstellung einer professionellen Hilfedatei ist die Erstellung einer Programmhilfe mit dem MS-HTML-Help-Workshop. HTML-Help ist das aktuelle Format zur Erstellung von Hilfedateien (*.chm).

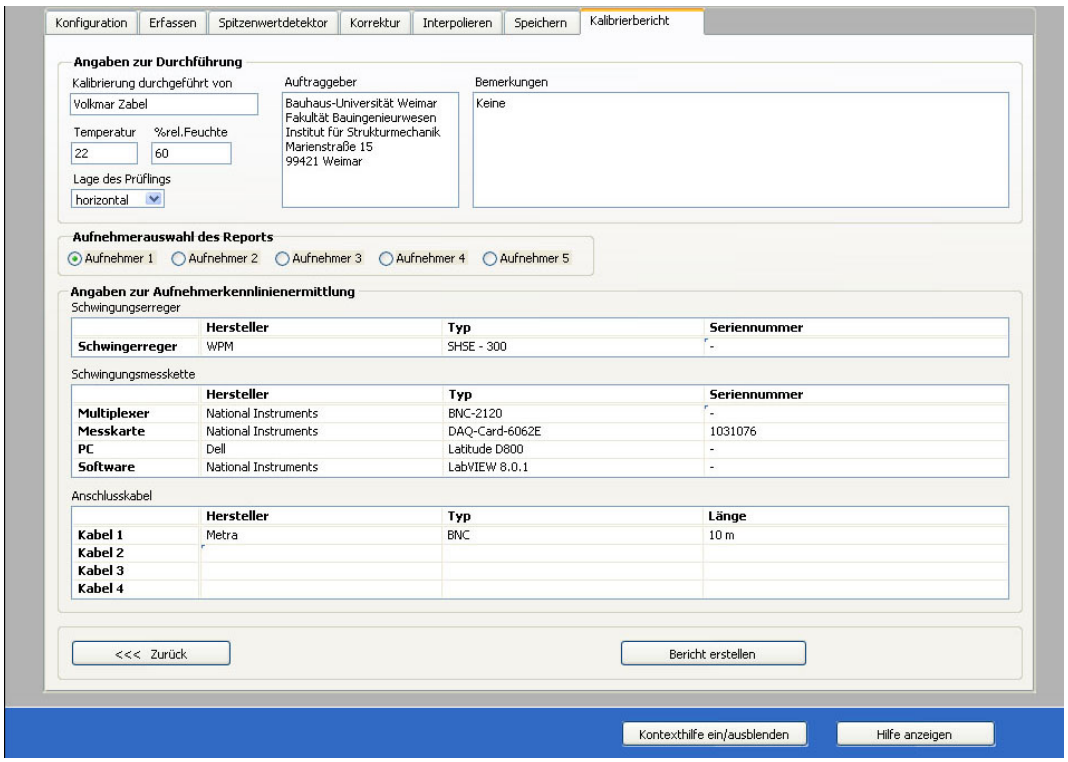


Abbildung 6.18: Aufnehmerkalibrierung - Kalibrierbericht, Frontpanel

Während der Programmentwicklung wurden nahezu alle Frontpanel-Elemente mit Tooltips und Beschreibungen versehen. Aufgrund der leichteren Verständlichkeit von Win-Help wurde die Programmhilfedatei ins Win-Help-Format compiliert. Die Hilfedatei liegt dem Programmsystem im Ordner Hilfedateien bei. In allen Modulen gibt es entweder die Möglichkeit die Hilfe über das Menü oder über eine Schaltfläche im Frontpanel zu öffnen. Es wird dann zum betreffenden Thema gesprungen. Außerdem existiert die Kontexthilfe. Sie läßt sich durch „Strg“+“H“, über das Menü oder eine Schaltfläche im Frontpanel öffnen oder schließen.

Kapitel 7

Kalibriermessungen

Zur Überprüfung der Funktionsweise des Programms und zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens von Aufnehmern und Messsystem wurden an der Versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Dabei handelte es sich um zwei verschiedene Vorgehensweisen.

7.1 Messsystem

Zur Messung des Übertragungsverhaltens des Messsystems wurde mittels eines Signalgenerators der Firma *Bruel&Kjaer* ein Sinussignal mit definierter Frequenz und Amplitude erzeugt. Dabei wurde im Frequenzband von $0,1$ bis $5Hz$ in Schritten von $0,1Hz$, von 5 bis $10Hz$ in $0,5Hz$ Schritten, von 10 bis $30Hz$ in $5Hz$ Schritten und von 50 bis $200Hz$ in $50Hz$ Schritten die Frequenz gesteigert. Es wurde immer eine konstante Amplitude von 1,0 Volt RMS erzeugt, dies entspricht 1,41 ($\sqrt{2}$) Volt Spitzenspannung.

Dieses Signal wurde auf den Analogeingang der Messkette gegeben und mit dem Messkettenkalibrier-Modul des Hauptprogramms aufgezeichnet. Dabei wurde eine Maximalspannung von $\pm 1,5V$ in der Konfiguration der Messkarte verwendet. Dies sichert die volle digitale Auflösung von 16 Bit über den gesamten Wandelbereich des ADC. Es wurde mit einer Abtastrate von $1000Hz$ und einer Anzahl von $n = 10000$ Samples pro Erfassungsdurchlauf gearbeitet. Daraus folgt eine zeitliche Auflösung von $dt = 0,001s$ und eine Frequenzauflösung von $df = 0,1Hz$. Durch die hohe Abtastfrequenz von $1000Hz$ liegt die Nyquist-Frequenz bei $500Hz$, das heißt es gibt keine Aliasing-Effekte bis zur obersten erzeugten Frequenz von $250Hz$. Aus den berechneten Spektren wurden mittels des Spitzenwertdetektors des Kalibriermoduls die angefahrenen Frequenzen und die zugehörigen Amplitudenwerte in ein 2D-Array extrahiert. Daraufhin wurde mit diesen Werten durch Splineinterpolation mit einer Frequenzauflösung $df = 0,1Hz$ eine Übertragungsfunktion des Messsystems erzeugt. Diese Funktion wurde in die programmeigene Datenbank gespeichert und steht nun zu Korrekturen des Messsystems zur Verfügung.

Durchgeführt wurden diese Messungen an verschiedenen Eingängen des SCXI-Erfassungssystem sowie an einem BNC-Anschlussblock der Firma *National-Instruments*. Wie in Abb.: 7.1 zu

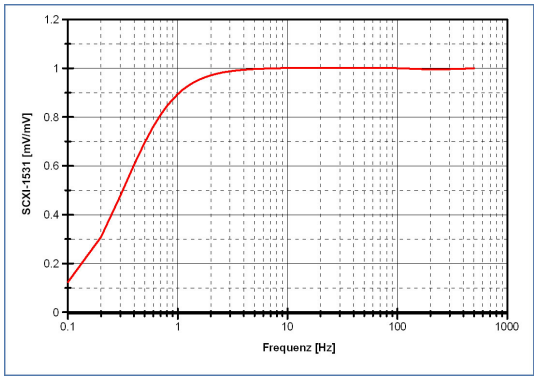


Abbildung 7.1: SCXI-Übertragungsverhalten, (Eigene Darstellung)

erkennen ist, besitzt das System eine starke Dämpfung des Signals im tieffrequenten Bereich. Dies resultiert aus einem integrierten Hochpass-Besselfilter zweiter Ordnung mit einer Eckfrequenz von $0,2Hz$. Wie aus der Abbildung zu erkennen wirkt sich der Filter bis in den Bereich von $5Hz$ aus.

7.2 Aufnehmer

Für die Messung des Übertragungsverhalten der Aufnehmer wurde eine andere Methode gewählt. Mit Hilfe eines servohydraulischen Schwingerregers der Firma *WPM-Werkstoff-Prüfmaschinen* (Abb.: 7.2) Leipzig und einer geeigneten Steuersoftware auf einem PC wurden verschiedene Aufnehmer geprüft. Der Erreger besitzt eine maximale Wegamplitude von

Abbildung 7.2: WPM-Schwingerreger mit Hydraulikaggregat

$\pm 100mm$ und bedingt durch die Konstruktion und die Regeltechnik einen maximal möglichen Frequenzbereich von $0,1$ bis $30Hz$. Dabei können frequenzabhängig auch nur bestimmte maximale Amplituden angefahren werden. So liegt begrenzt durch die Hydraulik die Obergrenze des Schwingweges bei $16Hz$ im Bereich von $\pm 2mm$, da sonst die entstehenden Kräfte zu groß würden.

Als Prüfobjekte dienten 12 Beschleunigungsaufnehmer der Firma *PCB* vom Typ 393 A 03/M116, vier Beschleunigungsaufnehmer der Firma *Metra* vom Typ KB12V und vier Geschwindigkeitsaufnehmer der Firma *IO* vom Typ SM-6-Horizontal.

Um die Übertragungsfaktoren der Aufnehmer möglichst genau zu bestimmen, ist es nötig die digitale Auflösung der Messkarte gut auszunutzen. Das heißt es sollte ein der Sensitivität des Aufnehmers entsprechender Messbereich verwendet werden. Was wiederum bedeutet, dass für jeden Aufnehmertyp ein unterschiedlicher Messbereich und eine unterschiedliche Anregung benutzt werden muss, um diesen Bereich möglichst konstant zu halten. Es sollte also

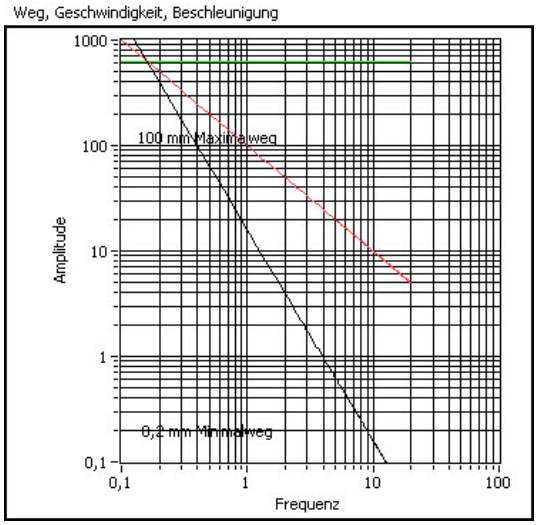


Abbildung 7.3: Weg bei konstanter Beschleunigung

entweder eine annähernd konstante Schwinggeschwindigkeit oder eine konstante Schwingbeschleunigung erreicht werden. Begrenzt durch die Grenzwerte der Schwingamplitude und die Sensitivität ergab sich ein Frequenzbereich der Messung von $0,4$ bis $16Hz$, bei einem jeweiligen Schwingweg von $\pm 99,47mm$ bis $\pm 2,49mm$ bei den Geschwindigkeitsaufnehmern und $\pm 98,95mm$ bis $\pm 0,06mm$ bei den Beschleunigungsaufnehmern. Dies entspricht einer konstanten Schwinggeschwindigkeit von $250mm/s$ beziehungsweise einer konstanten Schwingbeschleunigung von $625mm/s^2$ (Abb.: 7.3).

Bei einer Kalibrierungsmessung bei der Firma *Spektra* in Dresden im Herbst 2005 wurde mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers und Vergleich mit einem Normal bereits das Übertragungsverhalten einiger Aufnehmer bei bestimmten Frequenzen aufgenommen. Diese

Werte wurden mit Hilfe der Interpolationsfunktion des Aufnehmer-Kalibrierungs-Moduls in die Datenbank eingegeben. Somit standen die bereits gemessenen Werte als Referenz zur Verfügung. Die damals benutzten Frequenzen wurden auch jetzt wieder angefahren.

Für die Messungen der Übertragungsfunktionen der Geschwindigkeitsaufnehmer wurde ein SM6-Horizontal mit der internen Nummer 200-01 als Referenzaufnehmer gewählt. Bei der Messung der Beschleunigungsaufnehmer wurde ein KB12V mit der internen Nummer 2002-01 verwendet. Außer der Referenz wurden drei weitere Aufnehmer des gleichen Messtyps am Erreger befestigt (Abb.: 7.4). Die Signale der Aufnehmer wurden mit dem BNC-An-

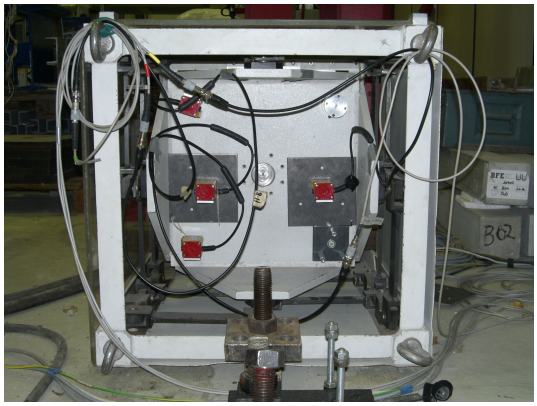


Abbildung 7.4: Montierte SM-6-Horizontal Aufnehmer

schlussblock und einer Datenerfassungskarte DAQ-6062 der Firma *National Instruments* digitalisiert. Für die gesamte Kalibrierung kam das entsprechende Modul des LabVIEW Hauptprogramms zum Einsatz. Im Einzelnen waren das folgende Schritte:

- Aufzeichnen der Daten mit dem Programm, $dt = 0,001s$, $df = 0,1Hz$
- Spitzenwertdetektion durch Vorgabe der Einzelfrequenzen
- Korrektur der Daten mit der Referenz (FFT-RMS-Messwerte der Referenz geteilt durch die Übertragungsfunktion der Referenz ergibt die „realen“ Beschleunigungen; FFT-RMS-Messwerte der Aufnehmer geteilt durch die realen Beschleunigungen ergibt die kalibrierte Übertragungsfunktion des Aufnehmers)
- Übernahme der Übertragungsfunktionswertepaare in die Interpolationstabelle und Interpolation
- Speichern der mit $df = 0,1Hz$ interpolierten Übertragungsfunktion unter Angabe von Aufnehmername, -typ, hersteller und -seriennummer in die interne Datenbank
- Protokollerstellung als Word-Datei durch die automatische interne Reportfunktion (Siehe: Anhang)

Die Kalibrierung ist noch nicht für alle Aufnehmer des Instituts für Strukturmechanik durchgeführt worden, aber es ist feststellbar, dass die Ergebnisse ausreichend genau sind. So besitzen die jetzt aufgenommen Sensoren eine Abweichung von ca. 1% in ihren Übertragungsfaktoren verglichen mit der Kalibrierung vor einem Jahr mit einem nationalem Messnormal. Dies ist sicherlich der Art und Weise der Berechnung der FFT-RMS-Spektren geschuldet. So wurde mit einem Maximalwerte-Speicher des FFT-Express-VIs gearbeitet, welcher eventuelle zu große Spitzen speichert und nicht mittelt. Da dieser Effekt sowohl bei den zu kalbrierenden Aufnehmern als auch bei der Referenz auftreten müsste, sollte er sich aufheben. Diese Problematik wird noch weiter untersucht werden.

Kapitel 8

Schlussbetrachtung

In dieser Arbeit wurden die bei der Erstellung der Studienarbeit [15] gewonnenen Erfahrungen vertieft und aufgetretene Probleme weitgehend gelöst. Durch die Entwicklung des Softwaresystems ist es gelungen, die Schwachstellen der Vorgängerversion zu eliminieren.

Es wurde ein Modul zur Erfassung von Kalibrierinformationen programmiert, welches alle gestellten Anforderungen erfüllt. Dazu gehören:

- programmatische Erfassung von Kennwerten ohne Vergleich einer Referenz
- programmatische Erfassung von Kennwerten mit Vergleich einer Referenz und Korrektur
- manuelle Eingabe von Kennwerten und Weiterverarbeitung
- speichern von Kennwerten in einer gemeinsam genutzten Datenbank
- integrierte Berichterstellung

Die Korrektur des Übertragungsverhaltens der Aufnehmer funktioniert problemlos. Sie wird realisiert durch ein Modul zur Korrektur im Frequenzbereich mit folgenden Eigenschaften:

- dynamisch aktivierbar
- Datenbankzugriff auf die Steuerdateien mit den Kalibrierinformationen
- Analyse des Eingangssignals und der Korrekturwerte
- automatische Anpassung der Signale
- am Modulausgang liegen sowohl das korrigierte und das nicht korrigierte Signal als auch die Korrekturfunktion an

Die dynamische Korrektur der Messwerte hinsichtlich ihrer Messgröße und der anzuzeigenden Größe kann realisiert werden. Das VI besitzt folgende Eigenschaften:

- dynamisch einstellbare Korrektur
- über Konfiguration festgelegte Eigenschaften

- Datenbankzugriff zu Bestimmung des Aufnehmertyps
- Auswahl einer gemeinsamen Anzeigegröße aller Aufnehmer
- abhängig vom Aufnehmertyp wird integriert oder differenziert

Im Aufbau des Hauptprogramms wurden grundlegende Änderungen eingeführt:

- konsequente Benutzung eigener SubVIs
- zwei getrennte Unterprogramme für Interaktion mit dem Nutzer und programmatische Aufgaben
- programmeigene Hilfe und Kontexthilfe
- geändertes LabVIEW Standardlayout der Benutzeroberfläche
- konsequente Benutzung von Systemanzeige- und Bedienelementen
- benutzen von Unterpanels, Möglichkeit der Darstellung von programmatisch angepassten Anzeigeelementen
- verstärkter Einsatz von Schieberegistern, Globalen Variablen, Eigenschaftsknoten und Konfigurationsdateien

In dieser Arbeit ist ein komplexes Softwaresystem entstanden, welches eine große Anzahl verschiedener Funktionen in sich vereint. Durch den Aufbau des Programms und die gute Dokumentation lassen sich auch zukünftige Erweiterungen leicht hinzugefügen.

Literaturverzeichnis

[1] Best, R. : *Handbuch der analogen und digitalen Filterungstechnik.* 2. Auflage. AT-Verlag, 1987 (ISBN 3-85502-148-1)

[2] Brüel&Kjaer: *Vibration Transducers and Signal Conditioning.* 2005 (BA 7675-12)

[3] Brüel&Kjaer: *Introduction to Shock & Vibration.* 2006 (BA 7674-12)

[4] Norm DIN 1319 Teil 3 Mai 1995. *Grundlagen der Messtechnik; Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße*

[5] Norm DIN 1319 Teil 4 Mai 1995. *Grundlagen der Messtechnik; Auswertung von Messungen mehrerer Messgrößen*

[6] Norm DIN 1319 Teil 2 Mai 1995. *Grundlagen der Messtechnik; Begriffe für die Anwendung von Messgeräten*

[7] Norm DIN 1319 Teil 1 Mai 1995. *Grundlagen der Messtechnik; Grundbegriffe*

[8] Norm DIN 45669 Teil 2 Juni 1995. *Messung von Schwingungsimmisionen; Messverfahren*

[9] Norm DIN 45669 Teil 1 Mai 1995. *Messung von Schwingungsimmisionen; Schwingungsmesser, Anforderungen, Prüfung*

[10] Norm DIN 4150 Teil 3 Februar 1999. *Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf bauliche Anlagen*

[11] Norm DIN 4150 Teil 2 Juni 1999. *Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden*

[12] Norm DIN 4150 Teil 1 Juni 2001. *Erschütterungen im Bauwesen; Vorermittlung von Schwingungsgrößen*

[13] Norm VDI 2057 Teil 1 September 2002. *Einwirkung mechanischer Schwingungen auf Menschen; Ganzkörperschwingungen*

[14] Norm VDI 2057 Teil 2 September 2002. *Einwirkung mechanischer Schwingungen auf Menschen; Hand-Arm-Schwingungen*

[15] Gramse, J. ; Prof.Dr. Bucher, C. (Hrsg.) ; Dr.Ing Zabel, V. (Hrsg.): *Entwicklung eines Messsystems zur Schwingungsmessung nach DIN 45669 mit Hilfe der Programmiersprache LabVIEW*. Studienarbeit. Bauhaus-Universität Weimar, 2006

[16] Jamal, R. ; Hagestedt, A. : *LabVIEW für Studenten*. 4. Auflage. Pearson Education, 2004 (ISBN 3-8273-7154-6)

[17] Lohninger, H. : *Angewandte Mikroelektronik*. E-Book. http://www.vias.org/mikroelektronik/filter_basic_terms.html. Version: Juni 2006

[18] NationalInstruments: *LabVIEW - Benutzerhandbuch*. 1. 11500 North Mopac Expressway Austin, Texas 78759-3504, USA, Juni 2003

[19] NationalInstruments: *LabVIEW - Measurements Manual*. 1. 11500 North Mopac Expressway Austin, Texas 78759-3504, USA, April 2003

[20] NationalInstruments: *LabVIEW - Erste Schritte mit LabVIEW*. 1. 11500 North Mopac Expressway Austin, Texas 78759-3504, USA, Juni 2004

[21] NationalInstruments: *Sound and Vibration Toolkit - User Manual*. 1. 11500 North Mopac Expressway Austin, Texas 78759-3504, USA, April 2004

[22] Ph.D Smith, S. W.: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. E-Book. http://www.dspguide.com/. Version: November 2001

[23] Schlemmer, H. : *Grundlagen der Sensorik: Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure*. 1. Auflage. Wichmann, 1996 (ISBN 3-87907-278-7)

[24] Tränkler, H.-R. ; Obermayer, E. (Hrsg.): *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 1. Auflage. Springer Verlag, 1998 (ISBN 3-540-58640-7)

[25] Wielandt, E. : *Seismographen*. Wechselwirkungen-(Jahrbuch aus Lehre und Forschung der Universität Stuttgart). http://www.geophys.uni-stuttgart.de/lehre/skripte/old_skripte/seismometry/seismo_htm/seismographen.htm. Version: Juli 1996

[26] Wikipedia: *Analog-Digital-Umsetzer*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/A/D-Wandler. Version: Juli 2006

[27] Wikipedia: *Analogfilter*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Analogfilter&oldid=18590938. Version: Juli 2006

[28] Wikipedia: *Übertragungsfunktion*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%9Cbertragungsfunktion&oldid=17889280. Version: Juli 2006

[29] Wikipedia: *Beschleunigungssensor*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Beschleunigungsmesser. Version: Juli 2006

[30] WIKIPEDIA: *Besselfilter*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Besselfilter. Version: Juli 2006

[31] WIKIPEDIA: *Butterworthfilter*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Butterworthfilter. Version: Juli 2006

[32] WIKIPEDIA: *Digital-Analog-Umsetzer*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/D/A-Wandler. Version: Juni 2006

[33] WIKIPEDIA: *Digitales Filter*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Digitales_Filter. Version: Juni 2006

[34] WIKIPEDIA: *Filter (Elektronik)*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Filter_%28Elektronik%29. Version: Juli 2006

[35] WIKIPEDIA: *Filter mit endlicher Impulsantwort*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/FIR-Filter. Version: Juni 2006

[36] WIKIPEDIA: *Filter mit unendlicher Impulsantwort*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Filter_mit_unbegrenztem_Impulsansprechverhalten. Version: Juni 2006

[37] WIKIPEDIA: *Grenzfrequenz*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Grenzfrequenz. Version: Juni 2006

[38] WIKIPEDIA: *Seismograph*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Seismometer. Version: Mai 2006

[39] WIKIPEDIA: *Tschebyschefffilter*. Wikipedia-Die freie Enzyklopädie. http://de.wikipedia.org/wiki/Tschebyschefffilter. Version: Juli 2006

Abbildungsverzeichnis

2.1 Dehnmessstreifen . . . 12
2.2 Wheatstonesche Brückenschaltung . . . 12
2.3 Frequenzabhängigkeit der Amplituden von x, $\dot{x}$ und $\ddot{x}$, (aus [2]) . . . 14
2.4 Vertikalseismograph von Cancani im Vesuvobservatorium, 1902, (aus [25]) . . . 14
2.5 Das Zürcher Blattfederseismometer, (aus [25]) . . . 15
2.6 Modernes Geophon, (aus [25]) . . . 15
2.7 Verschiedene Typen von Beschleunigungsaufnehmern, (aus [2]) . . . 16

3.1 Grundsätzliche Behandlung von Signalen . . . 23
3.2 Signaltypen . . . 24
3.3 Differentielle Messung . . . 29
3.4 Referenced Single Ended (RSE) . . . 29
3.5 Non Referenced Single Ended (NRSE) . . . 30
3.6 Geringe Ausgaberate des D/A-Wandlers . . . 30
3.7 Hohe Ausgaberate des D/A-Wandlers . . . 31

4.1 Tiefpass . . . 36
4.2 Hochpass . . . 36
4.3 Bandpass und Bandstop . . . 37
4.4 Amplituden-Frequenzgang verschiedener Filtertypen, $GF = 0,5Hz$, (aus [39]) 39
4.5 Amplituden-Frequenzgänge verschiedener Ordnungen eines Butterworth-Filters, (aus [31]) . . . 40

5.1 Frontpanel eines LabVIEW VIs . . . 47
5.2 Blockdiagramm eines LabVIEW VIs . . . 48
5.3 Anschlussblock eines SubVis . . . 49

6.1 Hauptprogramm, Frontpanel . . . 58
6.2 Grundeinstellungen - Programm, Frontpanel . . . 60
6.3 Grundeinstellungen - Taskeinstellungen, Frontpanel . . . 61
6.4 Grundeinstellungen - Pfadeinstellungen, Frontpanel . . . 62
6.5 Kanalkorrektur, Anschlussblock . . . 62
6.6 Kanalkorrektur, Blockdiagramm . . . 63
6.7 Messstatistik, Frontpanel . . . 64

6.8 HB-Soll-Test, Frontpanel 64
6.9 Messkettenkalibrierung - Erfassen, Frontpanel 65
6.10 Messkettenkalibrierung - Interpolieren, Frontpanel 66
6.11 Messkettenkalibrierung - Speichern, Frontpanel 67
6.12 Aufnehmerkalibrierung - Konfiguration, Frontpanel 68
6.13 Aufnehmerkalibrierung - Erfassen, Frontpanel 69
6.14 Aufnehmerkalibrierung - Spitzenwertdetektor, Frontpanel 70
6.15 Aufnehmerkalibrierung - Korrektur, Frontpanel 71
6.16 Aufnehmerkalibrierung - Interpolieren, Frontpanel 72
6.17 Aufnehmerkalibrierung - Speichern, Frontpanel 73
6.18 Aufnehmerkalibrierung - Kalibrierbericht, Frontpanel 74

7.1 SCXI-Übertragungsverhalten, (Eigene Darstellung) 76
7.2 WPM-Schwingerreger mit Hydraulikaggregat 76
7.3 Weg bei konstanter Beschleunigung 77
7.4 Montierte SM-6-Horizontal Aufnehmer 78

Tabellenverzeichnis

2.1 Aufnehmertypen, (Eigene Darstellung) 13
2.2 Wahrnehmung der bewerteten Schwingstärke KB, (aus [11]) 20

5.1 LabVIEW-Ausdrücke und konventionelle Argumente, (aus[16]) 47
5.2 Vergleich verschiedener Bus Systeme, (aus [16]) 51

Index

Übertragungsfunktion, 33

Abtastdauer, 27
Abtastrate, 27
ActiveX, 44, 53
ADC, 27
Aliasing, 27, 35
Anschlussblock, 46, 49

Bandpass, 36
Bandstop, 36
Blockdiagramm, 46, 48

DAC, 30
DAQ, 45
DAQmx, 45
Daten
    -quelle, 47
    -senke, 47
Datenfluss, 49
Digital I/O, 31
DLL, 52, 54
DMS, 12

Element
    Anzeige-, 47
    Bedien-, 47
    Steuer-, 48
Erfassung
    -arten, 28
EXE, 54

Filter
    Übertragungsverhalten, 33
    Aktive-, 35
    Analog-, 34
    Bessel-, 41
    Butterworth-, 39
    Dämpfung, 34
    Digital-, 35
    FIR-, 37
    Grenzfrequenz, 33
    IIR-, 38
    Kaskadierung, 34
    Ordnung, 34
    Passive-, 34
    Tschebyscheff-, 40
FireWire, 51
Frontpanel, 46

Geophon, 16
GPIB, 49, 50

Hochpass, 36

IEC
    -652, 49
IEEE, 50
    -1014, 50
    -1394, 51
    -1394b, 51
    -488, 50
Impulsreaktionsfunktion, 33
Induktion, 15

KB-Wert, 19
Knoten, 48

LabVIEW
    Datenanalyse, 49

Datenerfassung, 49
DSC, 45
FPGA, 46
Geschichte, 43
PDA, 45
Programmierung, 46
Real-Time, 45
Virtuelle Instrumente, 46
LSB, 26
LTI-System, 38

Masse, 28
MEMS, 16
Messung
direkt, 11
indirekt, 11
Multiplexer, 26
Multithreading, 44

NRSE, 30

OLE, 53

Piezoeffekt, 16
PXI, 50

Rampenverfahren, 24
RS
-232, 49, 50
-422, 50
RSE, 29

Seismograph, 14
Sensor
Dehnung, 12
Geschwindigkeit, 13
Sensoren
Beschleunigung, 16
Serielle Schnittstelle, 50
Symbol, 46

Tiefpass, 35
TTL, 31

USB, 50

Verbindungen, 48
Verstärkung, 27
VI, 46
VXI, 50

Wägeverfahren, 26
Wandlung
A/D-, 24, 27
D/A-, 30

Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Strukturmechanik
Marienstraße 13

Aufnehmerkennlinienprotokoll

Allgemeines

Datum der Kalibrierung:	20.09.2006
Uhrzeit:	19:01
Kalibrierung durchgeführt von:	Johannes Gramse
Auftraggeber:	

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Strukturmechanik
Marienstraße 15
99421 Weimar

Umgebungsbedingungen

Temperatur des Prüflings:	22 Grad
Relative Luftfeuchte:	60 %
Lage des Prüflings im Erdschwerefeld:	horizontal

Kalibriergegenstand

Aufnehmer:	2000 - 02
Aufnehmertyp:	Geschwindigkeit
Hersteller:	IO
Typ - Seriennummer:	SM-6-Horizontal

Messbedingungen

	Hersteller	Typ	Seriennummer
Schwingerreger	WPM	SHSE - 300	-

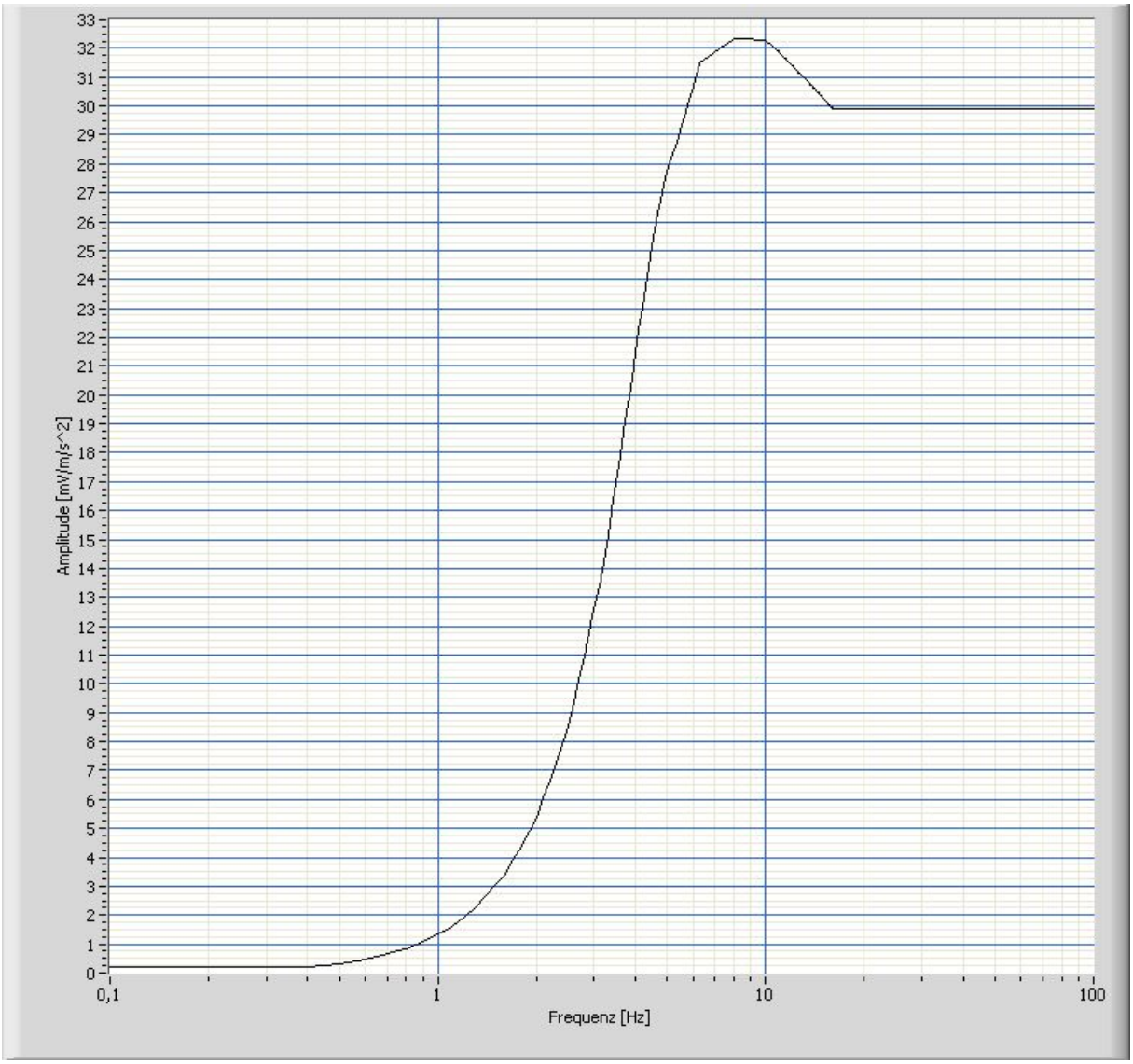
Messkette	**Hersteller**	**Typ**	**Seriennummer**
Multiplexer	National Instruments	BNC-2120	-
Messkarte	National Instruments	DAQ-Card-6062E	1031076
PC	Dell	Latitude D800	-
Software	National Instruments	LabVIEW 8.0.1	-

Anschlusskabel	**Hersteller**	**Typ**	**Länge**
Kabel 1	Metra	BNC	10 m
Kabel 2			
Kabel 3			
Kabel 4			

Übertragungsverhalten (Tabelle)

Frequenz [Hz]	Übertragungsfaktor [mV/Messgröße]
0,4	0,215123
0,5	0,335405
0,6	0,481021
0,8	0,851018
1	1,327772
1,2	1,905205
1,6	3,430165
2	5,386337
2,5	8,541067
3,2	14,204282
4	21,485807
4,2	23,034056
4,5	25,125277
4,7	26,283875
5	27,747776
6,3	31,523772
8	32,335741
10	32,281871
12,5	31,201171
16	29,895088
500	29,895088

Übertragungsverhalten (Graph)



Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Strukturmechanik
Marienstraße 13

Aufnehmerkennlinienprotokoll

Allgemeines

Datum der Kalibrierung:	20.09.2006
Uhrzeit:	16:22
Kalibrierung durchgeführt von:	Johannes Gramse
Auftraggeber:	

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Strukturmechanik
Marienstraße 15
99421 Weimar

Umgebungsbedingungen

Temperatur des Prüflings:	22 Grad
Relative Luftfeuchte:	60 %
Lage des Prüflings im Erdschwerefeld:	horizontal

Kalibriergegenstand

Aufnehmer:	2003 - 12
Aufnehmertyp:	Beschleunigung
Hersteller:	PCB
Typ - Seriennummer:	393A03/M116-11703/003442

Messbedingungen

	Hersteller	Typ	Seriennummer
Schwingerreger	WPM	SHSE - 300	-

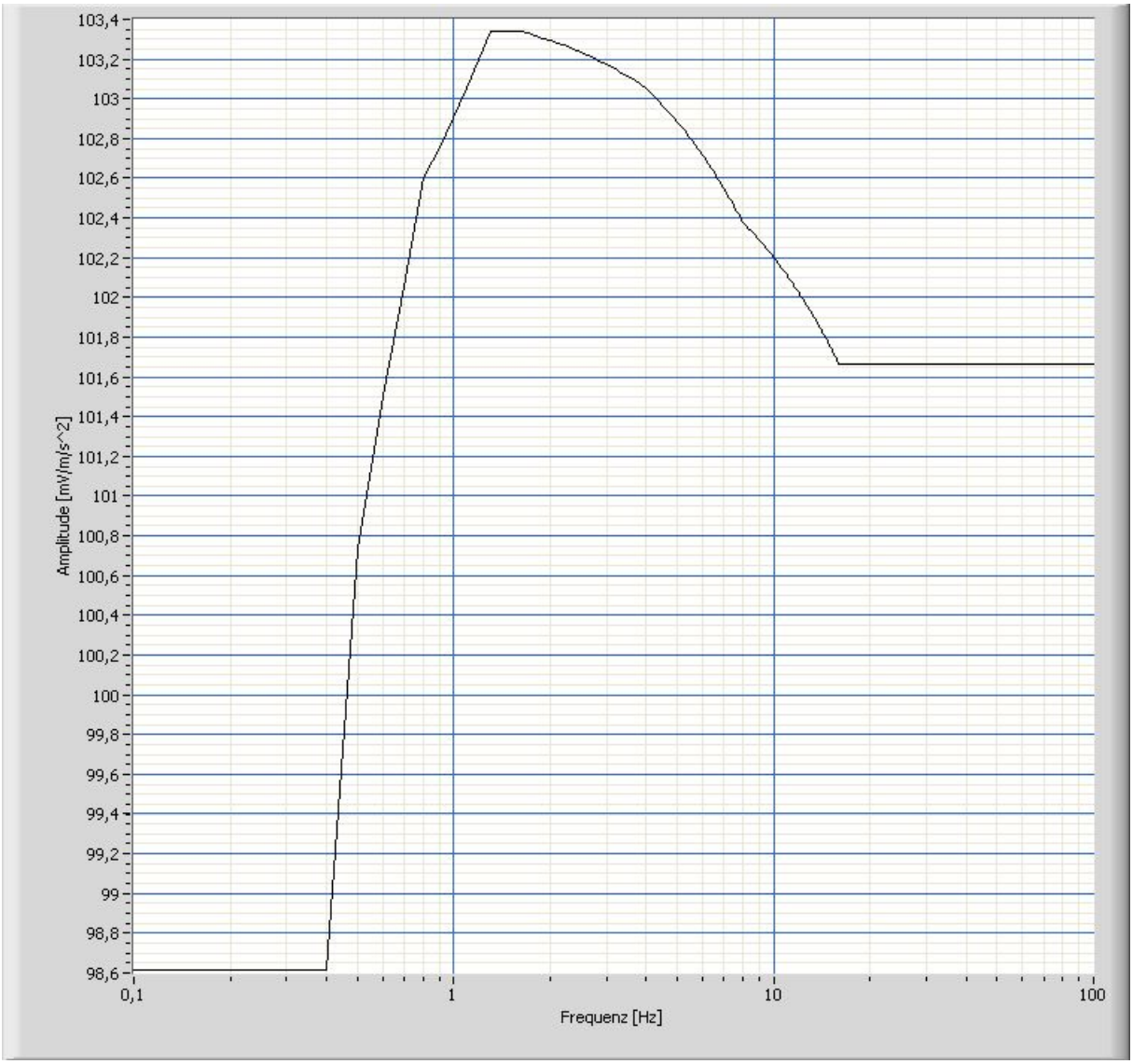
Messkette	**Hersteller**	**Typ**	**Seriennummer**
Multiplexer	National Instruments	BNC-2120	-
Messkarte	National Instruments	DAQ-Card-6062E	1031076
PC	Dell	Latitude D800	-
Software	National Instruments	LabVIEW 8.0.1	-

Anschlusskabel	**Hersteller**	**Typ**	**Länge**
Kabel 1	Metra	BNC	10 m
Kabel 2			
Kabel 3			
Kabel 4			

Übertragungsverhalten (Tabelle)

Frequenz [Hz]	Übertragungsfaktor [mV/Messgröße]
0,4	98,613412
0,5	100,731828
0,6	101,509077
0,8	102,607503
1	102,906909
1,3	103,342363
1,6	103,340598
2	103,294007
4	103,051982
8	102,379689
16	101,666913
500	101,666913

Übertragungsverhalten (Graph)



TRUE

FALSE

DFT, diskrete Division und iDFT zur Rücktransformation in den Zeitbereich

Erstellen der Signal verläufe, übernehmen der Originalattrbute (dt, t0,....) Hinzufügen beim Namen von " Aufnehmernummer"

Anpassen der Übertragungsfunktion an die aktuelle Abtastrate und die Abtastdauer des Messsignals durch Interpolation von Werten

Verwendete Kanäle
In dieser For-Schleife werden die Namenstrings der Aufnehmer zu Abfragen in die Messdatei verarbeitet. Am Ausgang liegen die Ref-Nums der jeweiligen Kanäle an.

Eigenschaften ermitteln
In dieser For-Schleife werden die ermittelten Ref-Nums zum Lesen der Kanaleigenschaften benutzt, ausgegeben werden Kanalname, Aufnehmertyp (für die jeweilige Einheit und eventuelle Integration/ Differentiation) und die Übertragungsfunktion zur Korrektur der Signale.

Anfügen von 1-Werten oberhalb der Nyquist-Frequenz

Fehlersuche: Bei mehr Messkanälen als Korrekturkanälen wird die ÜF 1 gesetzt

Festlegen der Eigenschaften der Übertragungsfunktionen jedes Kanals

Name
String
Kanal
NI_ChannelName
attributes
dt
t0
1D reell
linear
Interp 1d
Kein Dialog
NI_ChannelName
NI_ExpXDimension
NI_UnitDescription
"Wegaufnehmer"
mm
Y
attributes
dt